



Conception combinatoire des lignes de désassemblage sous incertitudes

Mohand Lounes Bentaha

► To cite this version:

Mohand Lounes Bentaha. Conception combinatoire des lignes de désassemblage sous incertitudes. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2014. Français. NNT : 2014EMSE0758 . tel-01134500

HAL Id: tel-01134500

<https://theses.hal.science/tel-01134500>

Submitted on 23 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



NNT : 2014 EMSE 0758

THÈSE

présentée par

Mohand Lounes BENTHAHA

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : GÉNIE INDUSTRIEL

Conception combinatoire des lignes de désassemblage sous incertitudes

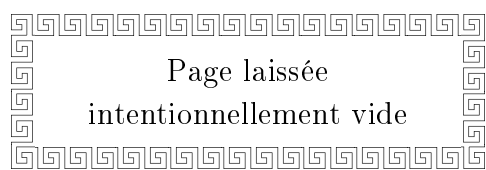
préparée au sein du LIMOS, UMR CNRS 6158
soutenue à Saint-Étienne, le 16 octobre 2014

Membres du jury

<i>Rapporteurs</i>	Lyes BENYUCEF	Professeur, Université Aix-Marseille
	Aziz MOUKRIM	Professeur, Université de Technologie de Compiègne
<i>Examineurs</i>	Yannick FREIN	Professeur, Institut Polytechnique de Grenoble
	Eric SANLAVILLE	Professeur, Université du Havre
	François CLAUTIAUX	Professeur, Institut de Mathématiques de Bordeaux
	S. Jack HU	Professeur, Université du Michigan
<i>Directeur</i>	Alexandre DOLGUI	Professeur, École des Mines de St-Étienne
<i>Co-encadrante</i>	Olga BATAÏA	Chargée de recherche, École des Mines de St-Étienne

Mise à jour : 28/03/2014

Spécialités doctorales	Responsables :	Spécialités doctorales		Responsables
SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX	K. Wolski Directeur de recherche	MATHEMATIQUES APPLIQUEES		O. Roustant, Maître-assistant
MECANIQUE ET INGENIERIE	S. Drapier, professeur	INFORMATIQUE		O. Boissier, Professeur
GENIE DES PROCEDES	F. Gruy, Maître de recherche	IMAGE, VISION, SIGNAL		JC. Pinoli, Professeur
SCIENCES DE LA TERRE	B. Guy, Directeur de recherche	GENIE INDUSTRIEL		A. Dolgui, Professeur
SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT	D. Grailliot, Directeur de recherche	MICROELECTRONIQUE		S. Dauzere Peres, Professeur
EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)				
ABSI	Nabil	CR		CMP
AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR2		FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR		SMS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BERGER DOUCE	Sandrine	PR2		FAYOL
BERNACHE-ASSOLLANT	Didier	PR0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean Pierre	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaid	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BRUCHON	Julien	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	SMS
BURLAT	Patrick	PR2	Génie Industriel	FAYOL
COURNIL	Michel	PR0	Génie des Procédés	DIR
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences et génie des matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSE	David	PR1	Sciences et génie des matériaux	SMS
DESRAYAUD	Christophe	PR2	Mécanique et ingénierie	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR0	Génie Industriel	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FEILLET	Dominique	PR2	Génie Industriel	CMP
FEVOTTE	Gilles	PR1	Génie des Procédés	SPIN
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	CIS
GOEURIOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
HAN	Woo-Suck	CR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
LI	Jean-Michel		Microélectronique	CMP
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MONTHAILLET	Frank	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
MOUTTE	Jacques	CR	Génie des Procédés	SPIN
NEUBERT	Gilles			FAYOL
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre			CMP
NORTIER	Patrice	PR1		SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	CR	Génie des Procédés	CIS
ROBISSON	Bruno			CMP
ROUSSY	Agnès	MA(MDC)		CMP
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)		FAYOL
ROUX	Christian	PR		CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
TRIA	Assia	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzystof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR1	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	CR	Génie industriel	CMP
ENISE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)				
BERGHEAU	Jean-Michel	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
BERTRAND	Philippe	MCF	Génie des procédés	ENISE
DUBUJET	Philippe	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FEULVARCH	Eric	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FORTUNIER	Roland	PR	Sciences et Génie des matériaux	ENISE
GUSSAROV	Andrey	Enseignant contractuel	Génie des procédés	ENISE
HAMDI	Hédi	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
LYONNET	Patrick	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
RECH	Joël	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SMUROV	Igor	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
TOSCANO	Rosario	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
ZAHOUANI	Hassan	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE



Page laissée
intentionnellement vide

Remerciements

L'expérience formidable que j'ai vécue durant les trois années qu'a duré ma thèse reste à jamais gravée dans ma mémoire et mon cœur. Elle m'a fait découvrir l'univers fascinant de la recherche et m'a initié à de multiples facettes de la vie. Surtout, les nombreuses personnes que j'ai eu la chance de rencontrer et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de mes travaux de recherche.

Principalement, j'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur Alexandre DOLGUI, pour la confiance qu'il m'a accordée et surtout pour ses qualités humaines et professionnelles qui m'ont beaucoup inspiré. Je le remercie pour tous ses conseils instructifs, son aide m'a été précieuse et me le sera pour toujours.

Je remercie ma co-encadrante Olga BATTAÏA, Chargée de recherche, qui a mené mon encadrement avec énergie. Elle a été un soutien permanent sur le plan professionnel et personnel. Je la remercie pour le temps qu'elle m'a accordé, les discussions scientifiques et toutes ses remarques qui ont permis d'améliorer la qualité de mes travaux.

Je tiens à remercier les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter l'évaluation de ce travail. Je remercie en premier lieu les Professeurs Lyes BENYOUCEF et Aziz MOUKRIM pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et de prendre de leurs temps pour la lire avec soin. Je remercie le Professeur Yannick FREIN pour avoir présidé ma soutenance de thèse et les professeurs Eric SANLAVILLE, François CLAUTIAUX et S. Jack HU pour avoir accepté d'être examinateurs et membres du jury.

Je tiens aussi à remercier tous les membres de l'équipe DEMO qui m'ont soutenu en particulier Xavier DELORME, pour ses remarques et conseils lors de ma pré-soutenance.

Un grand merci au Dr. Nitin SETH et Pr. Nagesh KUMAR et sa femme Padma KUMAR pour les discussions scientifiques que nous avons eu ensemble.

Un grand merci également à tous mes amis et à toutes les personnes que j'ai côtoyées durant ma thèse : Abdelnacer, Malik, Reda, Nadjim, Lyes, John, Michaël, Karim, Hamid, Fatme, les deux Christine, Eric, Xavier, Afafe, Oussama, Akram, Hossein, Qasim, Jian, Majumdar, Robert, Rodolphe, Mireille, Olivier, Esperan, Hassan, Nilou, Jean-François, Khakim, Nicolas, Audrey, Sophie, Sarra,... Sans oublier mes amis et collègues de bureau : Derrick, Guillaume, Evgeny, Sergey et Fuguo. Et tous les autres qui ne m'en voudront pas je l'espère... Un merci particulier à Reda et sa femme, Malik, Lyes, Afafe, Karim, Akram, Hossein, Khakim et Sergey qui ont organisé directement ou indirectement ma soutenance et le pot de ma soutenance.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus profonds à toute ma famille qui m'entoure et me soutient en permanence, malgré la distance qui nous sépare. Je leur dédie ce travail et leur exprime tout mon amour.



À la mémoire de mon père

À ma mère

À mes frères

À mes sœurs



On fait la science avec de
une maison avec de
accumulation de fait
une science qu'un tas de pierre
une maison.

Henri Poincaré

Table des matières

Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xvi
Liste des algorithmes	xvii
Introduction générale	1
1 Revalorisation des produits en fin de vie : désassemblage et lignes de désassemblage	5
1.1 Introduction	5
1.2 Revalorisation des produits en fin de vie	6
1.2.1 Récupération des produits	8
1.2.2 Récupération des matières	10
1.3 Désassemblage	10
1.3.1 Planification et ordonnancement	13
1.3.2 Séquencement	14
1.3.3 Équilibrage des lignes	17
1.3.4 Automatisation	19
1.3.5 Ergonomie	19
1.4 Conclusion	19
2 Prise en compte des incertitudes lors de la conception des lignes de production	21
2.1 Introduction	21
2.2 Conception des lignes de désassemblage	22
2.2.1 Temps de cycle	23
2.2.2 Graphe de précedence ET/OU	25
2.3 Conception des lignes de production sous incertitudes des durées opératoires des tâches	29
2.3.1 Durées incertaines des tâches d'assemblage	29

2.3.1.1	Modélisation par des lois de probabilité connues	29
2.3.1.2	Modélisation par des intervalles fermés	30
2.3.1.3	Modélisation par des nombres flous ou par des scénarios	30
2.3.2	Durées incertaines des tâches de désassemblage	31
2.4	Cas d'incertitudes étudiés pour la conception des lignes de désassemblage	31
2.4.1	Coût de recours de la ligne	32
2.4.2	Taux de service de la ligne	33
2.4.3	Moyennes des charges des postes de la ligne	33
2.5	Conclusion	34
3	Conception des lignes de désassemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches : méthode par génération de coupes	35
3.1	Introduction	35
3.2	Formulation du problème	36
3.2.1	Phase 1 : maximisation du profit de la ligne	36
	Complexité du problème	40
3.2.2	Phase 2 : équilibrage des charges de la ligne	41
3.3	Approche de résolution	43
3.3.1	Échantillonnage Monte Carlo simple	44
3.3.2	Échantillonnage latin hypercube	45
3.3.3	Résolution de la phase 1	45
	3.3.3.1 Décomposition de Benders	45
	3.3.3.2 Procédure d'approximation moyenne par échantillonnage	49
3.3.4	Résolution de la phase 2	55
3.4	Expérimentations et résultats d'optimisation	56
3.5	Conclusion	69
4	Approximation du problème de conception des lignes de désassemblage sous incertitudes par la programmation conique de second ordre	71
4.1	Introduction	71
4.2	Modélisation du problème	72
4.2.1	Programme stochastique avec contraintes conjointement probabilisées	72
4.2.2	Équilibrage des charges des postes de travail de la ligne	73
4.3	Approche de résolution par la programmation conique et l'approximation de fonctions	74
4.3.1	Borne supérieure du profit de la ligne	77
4.3.2	Bornes inférieures du profit de la ligne	78
4.4	Résultats numériques	81
4.5	Conclusion	87

5 Relaxation lagrangienne et simulation Monte Carlo : problèmes de conception des lignes et séquençement des tâches de désassemblage	89
5.1 Introduction	89
5.2 La relaxation lagrangienne pour la conception des lignes de désassemblage	90
5.2.1 Formulation du problème	90
5.2.2 Les problèmes lagrangien et dual lagrangien	91
5.2.3 L'algorithme du sous-gradient	92
5.3 Intégration des deux problématiques de conception des lignes et de séquençement des tâches de désassemblage	94
5.4 Résultats numériques	96
5.5 Conclusion	100
Conclusion générale	101
Travaux réalisés	105
Bibliographie	109

Liste des figures

1.1	Boucle fermée des activités de production classiques et de revalorisation. . .	7
1.2	Chaîne logistique fermée comme intégration des deux chaînes logistiques directe et inverse.	8
1.3	Flux typique d'une entité en fin de vie dans un système de remanufacturing.	9
1.4	Problématiques liées au désassemblage.	13
2.1	Exemple d'une ligne de désassemblage.	23
2.2	Exemple d'un produit : piston-bielle.	24
2.3	Le graphe ET/OU du piston-bielle.	26
2.4	Un exemple d'alternative de désassemblage complet.	27
2.5	Un exemple d'alternative de désassemblage partiel.	28
3.1	Un exemple d'alternative de désassemblage choisie.	42
3.2	Graphe de précedence simple issu de l'alternative de désassemblage choisie.	42
3.3	Diagramme de la méthode d'approximation moyenne par échantillonnage .	54
3.4	Écart d'optimalité en phase 1, maximisation du profit de la ligne.	61
3.5	Temps de résolution en secondes de la phase 1 avec l'échantillonnage Monte Carlo simple.	61
3.6	La solution choisie pour l'instance L99b : l'alternative de désassemblage et les tâches correspondantes pour chaque phase d'optimisation.	63
3.7	Équilibrage des charges et réduction du coût de recours de l'instance L99b : (a) phase 1, maximisation du profit de la ligne et affectation des tâches ; (b) phase 2, équilibrage des charges et ré-affectation des tâches.	64
3.8	Convergence des valeurs des bornes inférieures <i>BI</i> et supérieures <i>BS</i> des instances étudiées.	65
3.9	Intervalles de confiance de niveau 95% des valeurs des bornes inférieures <i>BI</i> et supérieures <i>BS</i> des instances étudiées.	66
5.1	L'alternative de désassemblage optimale de l'instance L99b, l'ordre de réalisation des tâches correspondant ainsi que leur affectation aux postes de travail.	99

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre le système d'assemblage et le système de désassemblage.	11
1.2	Comparaison technique et opérationnelle entre une ligne de désassemblage et une ligne d'assemblage.	12
1.3	Classification des travaux traitant du séquençement en désassemblage. . . .	16
2.1	Prévision sur une année des demandes d'un produit en fin de vie et ses composants.	24
2.2	Les tâches de désassemblage du produit avec les composants et sous-assemblages générés ainsi que leurs durées opératoires associées en secondes.	26
3.1	Instances de désassemblage de la littérature.	56
3.2	Maximisation du profit de la ligne : résultats d'optimisation avec échantillonnage latin hypercube.	59
3.3	Maximisation du profit de la ligne : résultats d'optimisation avec échantillonnage Monte Carlo simple.	60
3.4	Résultats d'optimisation de la phase d'équilibrage des charges.	62
3.5	Le coût de recours de l'instance L99b.	62
3.6	Instances considérées du problème SALBP-1 avec coût de recours fixe. . . .	67
3.7	Minimisation du nombre de postes de travail : résultats d'optimisation obtenus avec l'échantillonnage Monte Carlo simple.	68
3.8	Résultats d'optimisation de la phase d'équilibrage des charges.	69
4.1	Instances de désassemblage considérées.	81
4.2	Résultats d'optimisation : bornes inférieure et supérieure principales. . . .	82
4.3	Résultats d'optimisation : autres bornes inférieures.	82
4.4	Résultats d'optimisation des bornes principales : impact sur la valeur optimale de la variation de la précision d'approximation.	84
4.5	Résultats d'optimisation : équilibrage des charges.	84
4.6	Instances du problème SALBP-1 avec contraintes conjointement probabilisées.	85
4.7	Résultats d'optimisation avec les bornes principales.	86
4.8	Résultats d'optimisation de l'équilibrage des charges.	87

5.1	Instances de désassemblage étudiées.	96
5.2	Résultats d'optimisation de la relaxation lagrangienne.	97
5.3	Résultats d'optimisation de l'intégration des problèmes de conception et de séquencement des tâches de désassemblage.	98

Liste des algorithmes

1	Approximation de l'espérance mathématique du coût de recours de la ligne de désassemblage par la décomposition de Benders.	48
2	Procédure de calcul d'une borne supérieure du profit de la ligne de désassemblage.	51
3	Procédure de calcul d'une borne inférieure du profit de la ligne de désassemblage.	52
4	Procédure de calcul de l'écart d'optimalité des bornes inférieure et supérieure du profit de la ligne de désassemblage.	53
5	Algorithme du sous-gradient	92
6	Heuristique de transformation d'une solution non réalisable issue d'une itération de l'algorithme du sous-gradient en une solution faisable.	94

Introduction générale

Les produits en fin de vie sous toutes leurs formes (véhicules, appareils électriques et électroniques), ainsi que l'utilisation intensive des ressources naturelles (matières premières, énergie, eau, etc.) détériorent considérablement l'environnement [Morselli *et al.* 2010, Mayyas *et al.* 2012, Zorpas & Inglezakis 2012]. Afin de limiter leur impact, les gouvernements de plusieurs pays dans le monde ont engagé des actions législatives. L'objectif commun de ces réglementations est de préserver l'environnement en incitant les industriels à revaloriser leurs produits en fin de vie. Cette revalorisation se traduit par la réutilisation de produits ou de leurs composants (réparation, reconditionnement, ré-assemblage) et le recyclage (récupération des matières et de l'énergie).

La revalorisation des produits en fin de vie, imposée par les législations, représente aussi un intérêt économique. En effet, des gains économiques directs peuvent être obtenus par la réutilisation des matières et/ou des composants [Brito & Dekker 2003]. De plus, comme gains économiques indirects, la revalorisation des produits en fin de vie permet l'amélioration de l'image de l'entreprise, la protection de son marché et la satisfaction des attentes de ses clients [Johnson & Wang 1995, Toffel 2004].

Le processus de désassemblage joue un rôle primordial dans la revalorisation de produits. Il permet, effectivement, l'obtention de composants et/ou de matières qui peuvent être réutilisés ou recyclés avec des taux de récupération de matières rares beaucoup plus intéressants [Brennan *et al.* 1994, Moyer & Gupta 1997]. A grande échelle, l'utilisation des lignes de désassemblage est nécessaire pour traiter efficacement un grand volume de produits à revaloriser.

Pour tirer les avantages économiques qu'offre l'utilisation d'une ligne de désassemblage, plusieurs sources d'incertitudes liées aux structures, quantités et qualité des produits en fin de vie doivent être prises en compte. Ainsi, leurs modélisations mathématiques et approches de résolution font l'objet de ce mémoire. Les travaux qui y sont présentés tâchent à apporter des éléments de réponses aux questions suivantes :

- Comment représenter toutes les alternatives possibles de désassemblage d'un produit en fin de vie ?
- Comment représenter les différentes relations de précedence entre les tâches et les

différentes parties générées (composants, sous-assemblages) du produit ?

- Quel est le processus de désassemblage à retenir ?
- Quelles sont les tâches à réaliser, sachant que le processus de désassemblage peut être partiel et que les durées opératoires soient incertaines ?
- Combien de postes de travail sont nécessaires et quelles sont les tâches affectées à chaque poste de travail ?
- Comment limiter l'impact des matières dangereuses sur les opérateurs et la ligne de désassemblage ?

Nos réponses à ces questions sont présentées dans les cinq chapitres qui constituent ce manuscrit. Le chapitre 1 décrit les activités principales de la revalorisation des produits en fin de vie, en particulier le désassemblage. Les différences principales entre les processus de désassemblage et d'assemblage y sont également présentées.

Le chapitre 2 introduit le problème de conception des lignes de désassemblage et présente une démarche globale de sa résolution. Différents paramètres des lignes de désassemblage sont introduits et la modélisation des processus de désassemblage est établie. Par la suite, l'état de l'art sur la prise en compte des incertitudes lors de la conception des lignes de production (de désassemblage ou d'assemblage) est présenté. Les travaux de la littérature ont été classés selon deux catégories avec le focus sur les incertitudes des durées opératoires des tâches.

Le chapitre 3 présente la modélisation du problème de la maximisation du profit d'une ligne de désassemblage à concevoir, et où sont minimisés les arrêts de la ligne causés par les incertitudes des durées des opérations de désassemblage. Une approche de résolution intégrant la simulation Monte Carlo et la décomposition de Benders a été proposée. Une formulation pour équilibrer les charges des postes de désassemblage est aussi développée dans ce chapitre.

Dans le chapitre 4, un deuxième modèle prenant en compte le degré de satisfaction de la demande et maximisant le profit de la ligne est proposé. Cette formulation cherche à satisfaire conjointement les contraintes liées à la cadence de la ligne avec une certaine probabilité prédéterminée. Une approche de résolution exacte utilisant la programmation conique de second ordre et l'approximation linéaire de fonctions a été développée. Une autre formulation d'équilibrage des charges des postes de désassemblage est également présentée.

Le chapitre 5 présente deux autres modélisations pour la conception des lignes de désassemblage où sont considérées les moyennes des charges des postes de travail. Dans la première, le profit de la ligne est maximisé et une première version de la relaxation lagrangienne a été proposée pour sa résolution. La deuxième propose de concevoir une ligne de désassemblage avec un profit maximal qui intègre l'affectation des tâches aux postes de travail ainsi que l'ordre de leur exécution au niveau de chaque poste.

L'objectif de ces diverses contributions est de constituer la base d'un outil d'aide à la décision pour la conception des lignes de désassemblage sous incertitudes. En effet, les méthodes d'optimisation proposées dans ce manuscrit permettent aux décideurs, par exemple, d'évaluer le coût de traitement d'un produit en fin de vie et de faciliter le choix d'options de traitement (reconditionnement, recyclage, etc.). Les modèles développés permettent également de mieux comprendre les obstacles et les difficultés du processus de désassemblage et ainsi aider les concepteurs des produits à faire des choix qui faciliteraient leur désassemblage.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale où un bilan des travaux réalisés et des résultats obtenus est présenté. Plusieurs pistes de recherche futures y sont également proposées.

Chapitre 1

Revalorisation des produits en fin de vie : désassemblage et lignes de désassemblage

Sommaire

1.1	Introduction	5
1.2	Revalorisation des produits en fin de vie	6
1.2.1	Récupération des produits	8
1.2.2	Récupération des matières	10
1.3	Désassemblage	10
1.3.1	Planification et ordonnancement	13
1.3.2	Séquencement	14
1.3.3	Équilibrage des lignes	17
1.3.4	Automatisation	19
1.3.5	Ergonomie	19
1.4	Conclusion	19

1.1 Introduction

Comme mentionné dans l'introduction générale, les gouvernements de différents pays dans le monde ont engagé des actions législatives afin de limiter l'impact des déchets sous toutes leurs formes. Deux exemples types de ces réglementations sont les directives 2000/53/EC et 2012/19/EU du Parlement Européen.

La directive 2000/53/EC [Commission 2000] stipule certaines exigences techniques pour la conception de nouveaux véhicules et des niveaux minimaux quant à la réutilisation, le recyclage et la mise en décharge des Véhicules en Fin de Vie (VFDV). Par exemple, cette

directive spécifie, jusqu'au 01/01/2006, une revalorisation de 85% du poids d'un véhicule produit après 1980 (un recyclage de 80%); jusqu'au 01/01/2015, une revalorisation de 95% et un recyclage de 85%. Ainsi, cette réglementation pousse les constructeurs automobiles à augmenter le nombre de composants réutilisables et recyclables de leurs produits [Vermeulen *et al.* 2011, Santini *et al.* 2011]. Cette même directive interdit, aux industriels, l'utilisation des éléments chimiques tels que le plomb, le mercure, le cadmium ou le chrome hexavalent, dans les matériaux et composants des véhicules mis sur le marché après le 1^{er} juillet 2003.

L'objectif de la directive 2012/19/EU [Parliament 2012] est la contribution à la production et consommation durables et la responsabilisation aux Déchets des Appareils Électriques et Électroniques (DAEE). Elle vise à la réduction des DAEE et incite à l'utilisation efficace et responsable des matières premières. Dans l'article n°12 (page L 197/39) de cette directive, est indiqué clairement le rôle important à jouer par les producteurs afin de concevoir et produire des AEE qui prennent en considération la dimension environnement et facilite leur réparation, réutilisation, *désassemblage* et recyclage. Cette directive définit ainsi un ensemble potentiel d'activités à développer pour la revalorisation des produits. Il est intéressant de mentionner que les politiques issues de ces directives ne s'appliquent pas uniquement aux producteurs sur le sol européen, mais également aux industriels étrangers souhaitant introduire leurs produits sur le marché européen.

Hors Union Européenne, le Japon, Taïwan et la Corée du Sud ont élaboré des réglementations similaires en matière de revalorisation de produits [Che *et al.* 2011]. Des législations en la matière gagnent progressivement du terrain en Amérique du Nord [Toffel 2003, Gesing 2004, Zorpas & Inglezakis 2012]. La Chine a fait des efforts mais enregistre un retard dans l'élaboration de politiques de revalorisation des VFDV, malgré leur nombre important comparé à celui de l'Europe [Chen 2005, Chen & Zhang 2009, Che *et al.* 2011].

Dans ce chapitre, nous introduisons les concepts de base liés à la revalorisation des produits en fin de vie, en particulier le processus de désassemblage. Pour ce faire, nous commençons par nous situer dans une chaîne logistique à boucle fermée. Par la suite, les deux catégories principales de revalorisation des produits sont présentées. Puis, est présenté le processus de désassemblage qui représente l'étape obligatoire avant toute opération de revalorisation. Les différences physiques et opérationnelles entre les lignes de désassemblage et d'assemblage sont également présentées.

1.2 Revalorisation des produits en fin de vie

La revalorisation des produits est un ensemble d'activités dont le but est la récupération des composants, sous-assemblages et des matières des produits mis hors d'usage. Ces activités sont principalement réalisées pour des raisons suivantes :

- Finalités écologiques et économiques : afin de réduire la consommation des matières premières et les déchets mis définitivement en décharge, améliorer l'image des producteurs, créer des marchés de seconde main, satisfaire les attentes écologiques des ménages, etc.
- Obligations juridiques : principalement, pour répondre aux exigences des législations, directives et amendements gouvernementaux en matière de protection de l'environnement.

Dans la littérature, diverses activités associées à la revalorisation des produits ont été étudiées. La Figure 1.1 présente les différentes options de revalorisation d'un produit : réutilisation des produits et réutilisation des composants et sous-assemblages (reconditionnement et ré-assemblage); le recyclage; l'incinération; et la mise en décharge des résidus [Ashby 2012].

Ces activités viennent s'ajouter aux activités de production classiques pour former une boucle. Comme illustré dans la Figure 1.1, les points de liaison les plus apparents entre

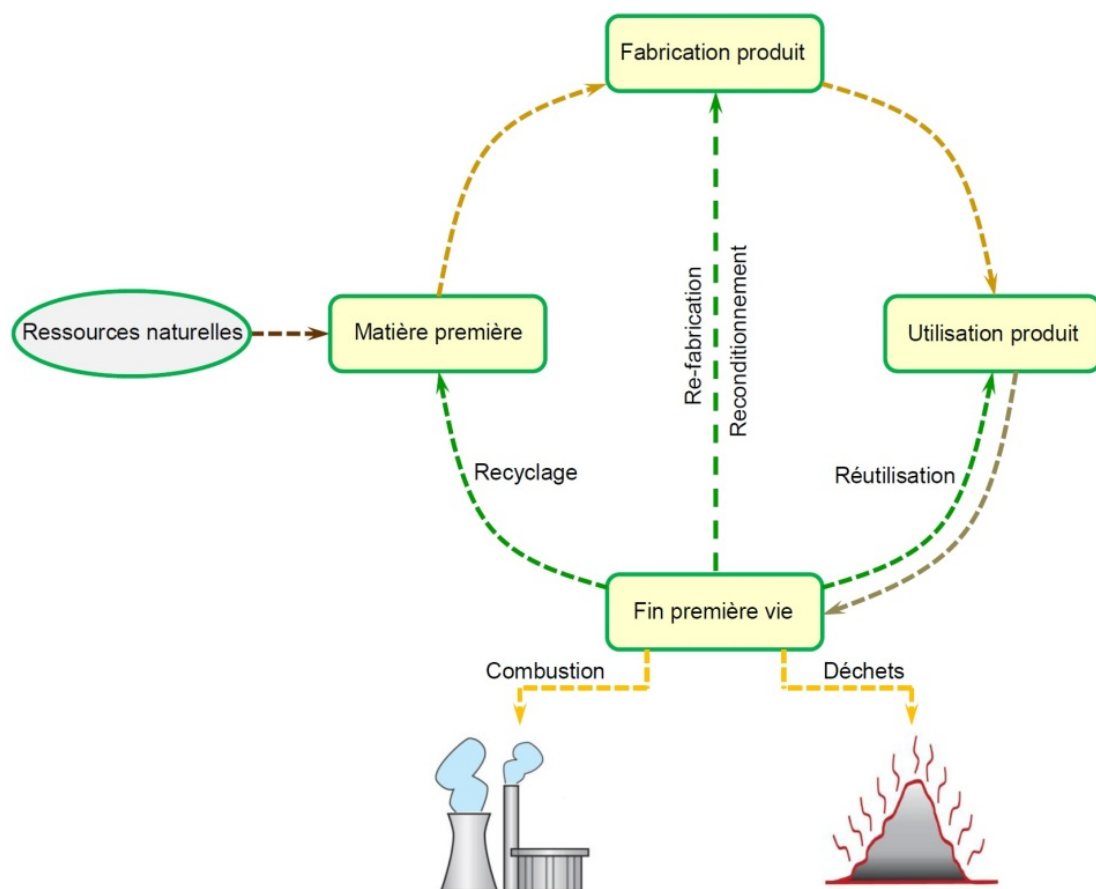


FIGURE 1.1 – Boucle fermée des activités de production classiques et de revalorisation.

les activités de production classiques et celles de revalorisation se situent au niveau de la réutilisation des composants, sous-assemblages, matières premières et énergie.

De la même manière que les activités de production classiques sont organisées en une chaîne logistique directe, les activités de revalorisation sont organisées en une chaîne logistique inverse. La connexion de ces deux chaînes forme ce que l'on appelle une chaîne logistique à boucle fermée. Un exemple d'une chaîne logistique fermée est donné dans la Figure 1.2 [Ma *et al.* 2011].

Dans ce qui suit, nous présentons plus en détail les activités liées à la récupération des produits et à la récupération des matières.

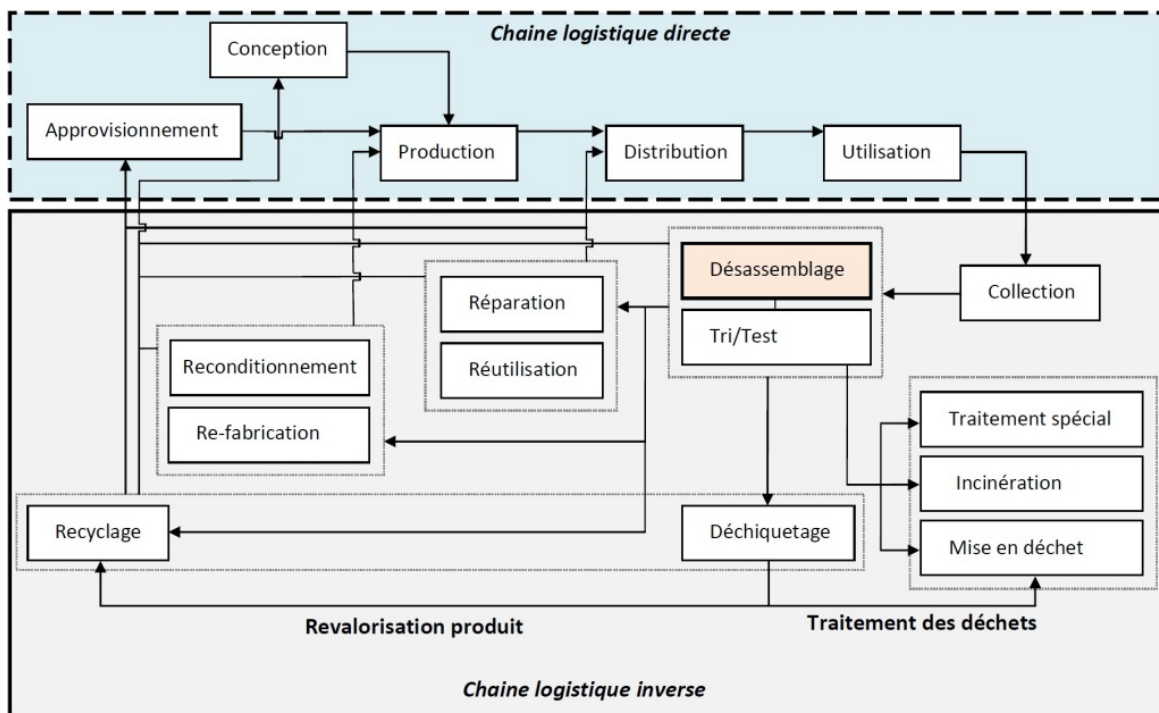


FIGURE 1.2 – Chaîne logistique fermée comme intégration des deux chaînes logistiques directe et inverse.

1.2.1 Récupération des produits

La récupération des produits inclut la réutilisation de produits entiers ou leurs composants et/ou sous-assemblages. Dans le deuxième cas, un désassemblage est requis. Puis, ils sont soit vendus soit ré-assemblés dans un autre produit. La Figure 1.3 [Güngör & Gupta 1999b], illustre le chemin que parcourt une entité (un produit en fin de vie ou une de ses parties) dans un processus de ré-assemblage.

Dans la récupération des produits, l'identité du produit ainsi que celles de ses composants sont conservées tant que c'est possible. Les composants des produits subissent les mêmes tests que ceux des composants destinés à l'assemblage de produits finis. Par exemple, le constructeur automobile BMW réutilise des parties du véhicule qui sont jugées très utiles (en termes de valeur économique) comme les moteurs, les alternateurs et les démarreurs. Ces parties subissent les contrôles qualité nécessaires avant d'être considérées comme pièces de rechange puis revendues à 30-50% moins chères que les pièces neuves [Altekin 2005].

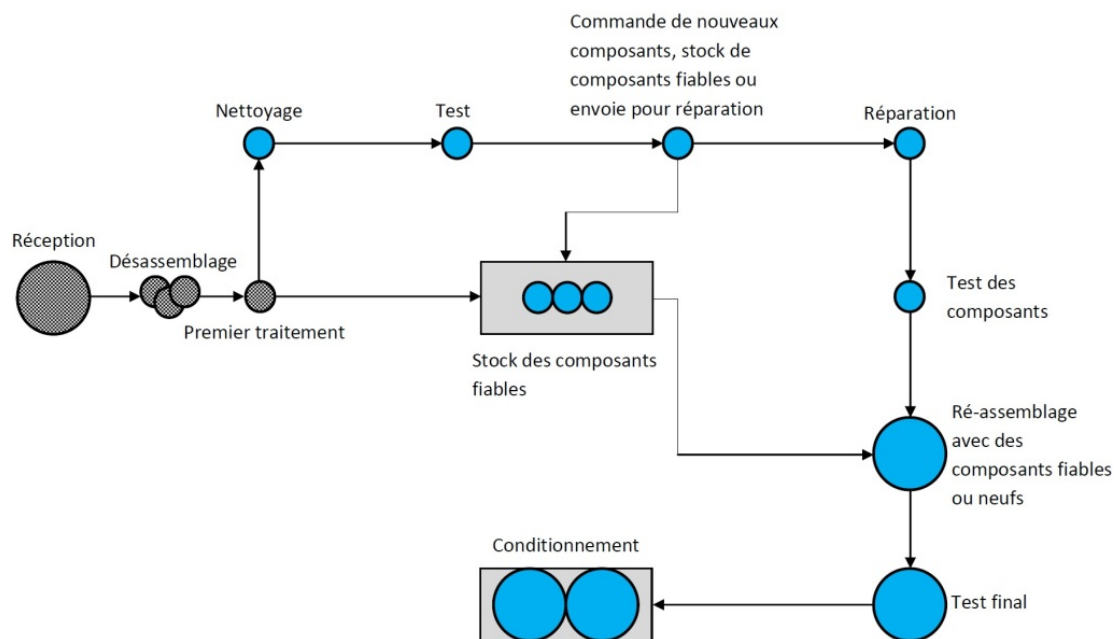


FIGURE 1.3 – Flux typique d'une entité en fin de vie dans un système de remanufacturing.

1.2.2 Récupération des matières

Dans la récupération des matières, un produit en fin de vie est désassemblé afin de séparer et de trier les différentes matières qu'il contient pour permettre leur recyclage. Le recyclage ne se limite pas uniquement à la réutilisation des matières mais aussi à la récupération de l'énergie qu'elles contiennent (principalement via incinération).

Lors du processus de recyclage, contrairement aux cas de récupération des produits, l'identité et la fonctionnalité du produit ainsi que celles de ces composants seront perdues. Selon la qualité, la valeur et l'utilité des matières recyclées, elles peuvent être utilisées pour la production de nouveaux composants : les matières premières de meilleure qualité seront employées pour la production de composants critiques, celles contenant des impuretés pourront servir à la production d'autres composants.

Le processus commun des activités de récupération des produits et des matières, comme l'illustrent les Figures 1.2 et 1.3 et comme mentionné plus haut, est bel et bien le *processus de désassemblage*. En effet, le désassemblage est un processus qui intervient avant toute opération de revalorisation des produits et des matières, il est pratiquement requis pour tous les produits en fin de vie (DAEE, VFDV, etc.) [Ilgin & Gupta 2012]. La section suivante a pour but d'introduire le processus de désassemblage ainsi que les principaux thèmes d'étude qui lui sont associés.

1.3 Désassemblage

Le processus de désassemblage est un ensemble d'opérations qui peut être défini comme une séparation méthodique d'un produit en ses différents sous-assemblages, composants, matières ou toute autre forme décomposée du produit, ainsi que les opérations de tri qui leurs sont associées [Lambert & Gupta 2005b, Gupta & Taleb 1994].

Le processus de désassemblage possède des caractéristiques physiques et opérationnelles différentes et plus complexes que celles de l'assemblage. En effet, la différence la plus évidente est celle des flux : le désassemblage est un processus divergent (un produit est décomposé en plusieurs composants et/ou sous-assemblages) contrairement à l'assemblage qui est convergent (plusieurs composants convergent vers un seul produit). Dans un système de désassemblage, un produit est éclaté en sous-assemblages et composants dont les quantités et la qualité ne peuvent être ni connues ni maîtrisées, a priori, comme dans un système d'assemblage. Un processus d'assemblage est forcément complet alors que, pour des raisons techniques et économiques, le désassemblage est essentiellement partiel. Par exemple, deux composants qui ne peuvent plus être séparés à cause d'une rouille représente une difficulté technique, tandis que, le coût d'un désassemblage s'avérant plus important que les revenus des composants récupérés représente une difficulté économique.

Les structures et la qualité des produits en fin de vie sont deux paramètres hautement incertains. Dans un système d'assemblage, les composants et différentes parties du produit subissent plusieurs contrôles qualité avant d'être assemblés. Il en résulte un niveau d'incertitude quasi inexistant lors de l'assemblage. Cependant, dans le cas du désassemblage, la qualité des produits en fin de vie est souvent inconnue : parfois les produits reçus sont bons et plutôt neufs, parfois sont totalement défectueux, etc.

Contrairement au cas d'un produit assemblé (neuf), même le nombre de composants constituant un produit en fin de vie ne peut être prévu. En effet, l'utilisateur peut rajouter ou enlever des composants au cours de l'exploitation d'un produit avant de le mettre hors d'usage ou de le jeter. Dans le cas de l'assemblage, la demande concerne un produit fini, alors que dans le cas du désassemblage la demande peut concerner à la fois le produit entier et les sous-assemblages et composants de ce dernier. Le Tableau 1.1, présenté dans [Brennan *et al.* 1994, Güngör & Gupta 1999b], regroupe les différences essentielles entre le processus de désassemblage et celui d'assemblage. Une comparaison technique et opérationnelle entre une ligne d'assemblage et une ligne de désassemblage est résumée dans le Tableau 1.2 présenté dans [Güngör & Gupta 2001b].

Les problèmes de gestion des flux et des stocks, qui peuvent résulter des disparités ou des écarts importants entre les demandes des composants et sous-assemblages et leur obtention ou récupération à partir des produits en fin de vie, ont été également étudiés [Brennan *et al.* 1994, Güngör & Gupta 1999b]. De plus, d'autres sources d'incertitudes as-

TABLE 1.1 – Comparaison entre le système d'assemblage et le système de désassemblage.

Caractéristique système	Assemblage	Désassemblage
Type de la demande	unique	multiple
Nécessité de prévision	entité unique	entités multiples
Horizon de planification	cycle de vie produit	indéfini
Orientation de la conception	conception pour l'assemblage	conception pour le désassemblage
Planification des installations et des capacités	simple	complexe
Complexité des opérations	moyenne	élevée
Flux des produits	convergent	divergent
Flux des matières	direct	inverse
Gestion des stocks des sous-assemblages	aucun	potentiellement plusieurs
Existence d'outils de planification	plusieurs	aucun

TABLE 1.2 – Comparaison technique et opérationnelle entre une ligne de désassemblage et une ligne d’assemblage.

Caractéristique ligne	Ligne d’assemblage	Ligne de désassemblage
Entité demandée	produit fini	composants, matières sous-assemblages
Incertitude qualité parties	faible	élevée
Incertitude quantités parties	faible	élevée
Incertitude postes de travail	faible	élevée
Incertitude système de transport	faible	élevée
Flexibilité requise	faible à moyenne	élevée
Complexité mesure performance	moyenne	élevée
Mesures de performance connues	plusieurs	quelques-unes
Robustesse requise	moyenne	élevée
Techniques d’optimisation connues	plusieurs	métaheuristiques

sociées à la fiabilité des différentes composantes du système de désassemblage (postes de travail, convoyeurs) émergent : certains composants des produits en fin de vie peuvent causer des dégâts et des nuisances (pannes des machines, arrêts des postes de travail) à cause de leur nature dangereuse et/ou polluante (acides, huiles, gaz, etc.). Par conséquent, les produits en fin de vie contenant des matières dangereuses doivent faire l’objet d’un traitement adéquat pour non seulement la sécurité des personnes mais aussi améliorer le fonctionnement d’un poste de travail.

Les travaux traitant les problématiques liées au désassemblage, selon [Ilgin & Gupta 2010], peuvent être classées en différentes catégories : la planification et l’ordonnancement, le séquençement, l’équilibrage des lignes, l’automatisation du processus de désassemblage et l’ergonomie. Ces différentes problématiques sont illustrées dans la Figure 1.4 [Ilgin & Gupta 2010], elles sont présentées ci-après.

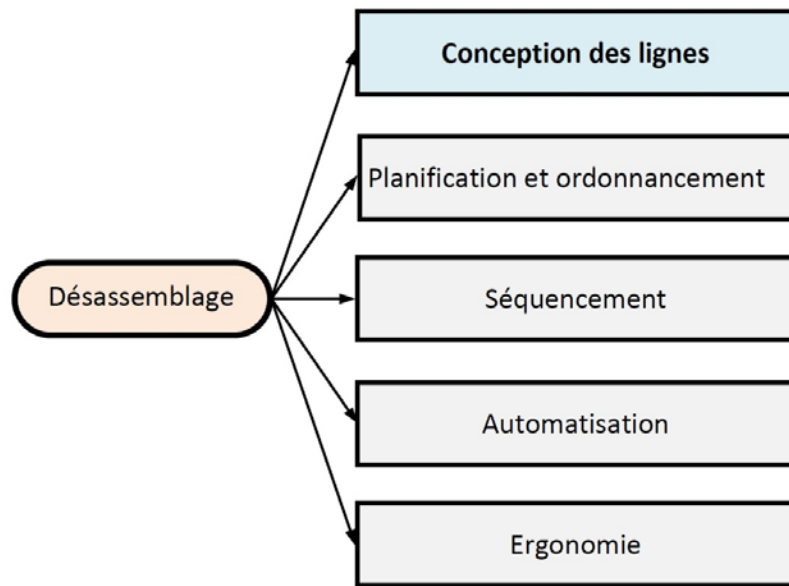


FIGURE 1.4 – Problématiques liées au désassemblage.

1.3.1 Planification et ordonnancement

La planification de désassemblage peut être vue comme l'inverse de la MRP (Material Requirement Planning). Pour rappel, la planification des besoins en composants cherche à établir la programmation de la production sur la base d'un système d'information. Partant des données physiques (stocks disponibles, livraisons attendues, demandes prévisionnelles, capacités de production, etc.) et des données comptables (coûts de production, d'approvisionnement, de rupture, etc.), on établit un plan de production qui détermine pour chaque période les quantités à produire par produit, les quantités fabriquées dans chaque centre productif, le niveau de stock en produits semi-finis et finis et l'utilisation des facteurs travail et machines [De Wolf 2003].

De manière analogique, la planification concernant le désassemblage vise à déterminer les types et nombres des produits en fin de vie, sous-assemblages et composants à désassembler et les délais de livraison associés pour satisfaire la demande sur un horizon de planification donné [Ilgin & Gupta 2010, Kim *et al.* 2007, Lambert & Gupta 2005b].

Le problème d'ordonnancement est un sous-problème de planification dans lequel on décide de l'exécution opérationnelle des tâches (ordres, calendrier, opérations de désassemblage, etc.) planifiées et d'allocation des ressources (travail, machines, capital, temps, énergie, etc.), et qui vise à optimiser un ou plusieurs objectifs, par exemple, minimiser le temps total d'achèvement d'un ensemble de tâches, minimiser le nombre de retards de livraison, minimiser le nombre de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches, etc.

L'objectif le plus fréquent des travaux de la littérature traitant les problématiques de planification et d'ordonnancement dans le domaine de désassemblage consiste à minimiser les coûts d'acquisition, d'installation, de stockage et de désassemblage des produits en fin de vie. Ces travaux sont très variés et peuvent être classés selon plusieurs catégories. Les produits en fin de vie concernés peuvent être de même type [Gupta & Taleb 1994, Lee & Xirouchakis 2004, Barba-Gutierrez *et al.* 2008, Morgan & Gagnon 2013], de types multiples sans prise en compte de composants et/ou sous-assemblages en commun [Brander & Forsberg 2005, Kang *et al.* 2012], avec prise en compte des parties en commun [Taleb & Gupta 1997, Taleb *et al.* 1997, Kim *et al.* 2003, Kim *et al.* 2006b, Kim & Lee 2011, Prakash *et al.* 2012, Zhang *et al.* 2014a]. La planification peut ne concerner que le recyclage des matières premières [Stuart & Christina 2003, Rios & Stuart 2004] ou bien le reconditionnement, la réutilisation et le ré-assemblage des composants et sous-assemblages [Kim *et al.* 2009a, Lee *et al.* 2010, Ahn *et al.* 2011, Lage Jr. & Filho 2012, Wang & Huang 2013].

La planification peut considérer les capacités de production [Lee *et al.* 2002, Kim *et al.* 2006c, Kim *et al.* 2006a, Chen *et al.* 2010] ou ne pas en tenir compte. La grande majorité des papiers traitent le problème de planification en contexte déterministe mais aussi en contexte incertain [Barba-Gutiérrez & Adenso-Díaz 2009, Godichaud *et al.* 2009, Grochowski & Tang 2009, Godichaud *et al.* 2010, Kim & Xirouchakis 2010]. Pour modéliser les problématiques étudiées, différents travaux ont eu recours le plus souvent aux outils de programmation mathématique [Lee *et al.* 2004, Chen & Gao 2009, Li *et al.* 2009, Doh & Lee 2010, Kang & Hong 2010, Azab *et al.* 2011, Ondemir & Gupta 2014] et de simulation [Gu & Gao 2011, Zhang *et al.* 2011, Gao *et al.* 2012, Iacob *et al.* 2012]. Les approches de résolution adoptées sont quelquefois exactes [Kim *et al.* 2009c, Wang & Huang 2013, Chen & Abrishami 2014] mais majoritairement heuristiques ou méta-heuristiques.

1.3.2 Séquencement

Le problème de séquencement des opérations de désassemblage vise à déterminer le meilleur ordre possible de leur exécution [Subramani & Dewhurst 1991, Kara *et al.* 2006, Lambert & Gupta 2008].

Ce problème est intensivement étudié dans la littérature. Nous avons regroupé la plupart des travaux traitant le sujet selon plusieurs catégories qui sont principalement les approches de résolution adoptées. Les deux objectifs recherchés le plus souvent sont ceux de maximiser le profit des composants et sous-assemblages récupérés et de minimiser les coûts de désassemblage.

Les approches de résolution exactes proposées sont généralement de type procédure de séparation et évaluation (PSE), elles s'appuient pour la plupart sur la programmation

linéaire entière. Quelques papiers utilisent également des méthodes de graphes (MG). Les travaux proposant des approches heuristiques sont nombreux et se basent pour la plupart sur les réseaux de Petri (RP).

Les méthodes méta-heuristiques développées se basent sur des algorithmes génétiques (AG), colonies de fourmis (CF), colonies d'abeilles (CB), les réseaux de neurones (RN), le recuit simulé (RS), ainsi que d'autres types d'heuristiques et méta-heuristiques (AEM). La simulation est également une approche de plus en plus utilisée (SIMU). Différents travaux considèrent le problème de séquençement en contexte incertain (CI). D'autres travaux s'intéressent plutôt au niveau de désassemblage (partiel ou complet) à adopter afin de maximiser le profit généré par l'activité de désassemblage (PCP).

Le Tableau 1.3 ci-après regroupe la majorité des papiers traitant le problème de séquençement qui sont classés selon les différentes catégories su-mentionnées.

TABLE 1.3 – Classification des travaux traitant du séquençement en désassemblage.

Catégorie	Références
PSE	[Lambert 1999, Güngör & Gupta 2001a, Lambert 2006, Sarin <i>et al.</i> 2006, Lambert 2007] [Lambert & Gupta 2008, Song <i>et al.</i> 2010, Zhang & Zhang 2010, Han <i>et al.</i> 2013]
MG	[Lambert 1997, Kaebernick <i>et al.</i> 2000, Adenso-Diaz <i>et al.</i> 2008]
RP	[Güngör & Gupta 1997, Zeid <i>et al.</i> 1997, Moore <i>et al.</i> 1998, Zussman & Zhou 2000, Moore <i>et al.</i> 2001] [Tiwari <i>et al.</i> 2001, Rai <i>et al.</i> 2002, Mascle & Balasoiu 2003, Singh <i>et al.</i> 2003, Zhao <i>et al.</i> 2010]
AG	[Seo <i>et al.</i> 2001, Li <i>et al.</i> 2005, Kongar & Gupta 2006, Giudice & Fargione 2007, Shimizu <i>et al.</i> 2007] [Hui <i>et al.</i> 2008, Wu & Zuo 2009a, Tseng <i>et al.</i> 2010, Chen <i>et al.</i> 2012, El Sayed <i>et al.</i> 2011] [Go <i>et al.</i> 2012, Haitao & Liang 2014]
CF	[McGovern & Gupta 2006, Tripathi <i>et al.</i> 2009, Fang <i>et al.</i> 2010, Mi <i>et al.</i> 2011, Xing <i>et al.</i> 2012] [Wang & Shi 2014, Puente <i>et al.</i> 2010, Zhong <i>et al.</i> 2011, Lu & Liu 2012, Tsai 2012]
CB-RN	[Percoco & Diella 2013, Hsin-Hao <i>et al.</i> 2000]
RS	[Wu & Zuo 2009b, Liu <i>et al.</i> 2011, Tseng <i>et al.</i> 2011a, Tseng <i>et al.</i> 2011b, Xu <i>et al.</i> 2011, Yeh 2012a] [Yeh 2012b, Yeh & Wei 2013]
AEM	[Gonzalez & Adenso-Diaz 2006, Tian <i>et al.</i> 2009, Zhang & Zhang 2009, Lu & Sun 2010] [Hassan & Yoon 2010, Yang <i>et al.</i> 2012, Yu 2012, Guo <i>et al.</i> 2012, Dong & Zhang 2013] [Wan & Gonnuru 2013, Xia <i>et al.</i> 2013]
SIMU	[Zha & Lim 2000, Dong & Arndt 2003, Hu <i>et al.</i> 2009, Aleotti & Caselli 2011]
CI	[Güngör & Gupta 1998, Kumar <i>et al.</i> 2003, Gao <i>et al.</i> 2004, Tang <i>et al.</i> 2006, Reveliotis 2007] [Zhao & Li 2010, Ruijun <i>et al.</i> 2011, Behdad <i>et al.</i> 2012, Behdad & Thurston 2012] [Song <i>et al.</i> 2013, Tian <i>et al.</i> 2013, Behdad <i>et al.</i> 2014, Zhang <i>et al.</i> 2014b]
PCP	[Zussman & Zhou 1999, Kuo 2000, Erdos <i>et al.</i> 2001, Torres & Aracil 2003, Chung & Peng 2006] [Tripathi <i>et al.</i> 2009, Smith & Chen 2011, Smith & Chen 2012, Smith <i>et al.</i> 2012, Song & Pan 2012] [Agrawal <i>et al.</i> 2013, Li <i>et al.</i> 2013, Song <i>et al.</i> 2014, Zhao <i>et al.</i> 2014a, Zhao <i>et al.</i> 2014b]

1.3.3 Équilibrage des lignes

Dans la littérature, le problème d'équilibrage des lignes de désassemblage consiste en l'affectation des tâches de désassemblage à une séquence de postes de travail sous les contraintes de précédence entre les tâches et les contraintes du temps de cycle. L'objectif le plus courant est la minimisation du nombre de postes de travail requis [McGovern & Gupta 2011].

Même si ce problème est plus connu dans la littérature sous le nom d'équilibrage des lignes, la solution obtenue ne donne pas forcément une ligne bien 'équilibrée'. Ainsi, dans ce mémoire, nous appelons ce problème *conception des lignes de désassemblage*. Ce dernier sera étudié dans les chapitres 3-5 alors que le chapitre 2 donne un aperçu des travaux réalisés dans la littérature sur ce sujet sous incertitudes.

Dans cette sous-section, la majorité des travaux traitant la conception et l'équilibrage des lignes de désassemblage en contexte déterministe sont revus et classés suivant l'approche de résolution adoptée. Les travaux traitant des incertitudes autres que celles des durées opératoires des tâches sont également référencés.

Plusieurs heuristiques et méta-heuristiques ont été proposées. Différentes heuristiques ont été développées dans [Güngör & Gupta 1999a, Duta *et al.* 2008, Avikal *et al.* 2013, Avikal *et al.* 2014] pour la minimisation du nombre de poste de travail. Tang *et al.* [Tang *et al.* 2001] ont présenté une heuristique permettant de concevoir des lignes de désassemblage multi-produits. Les même auteurs dans [Tang & Zhou 2006] ont développé une autre heuristique se basant sur les réseaux de Petri pour la conception des lignes de désassemblage de profit maximal et prenant en compte la défaillance de composants. Pour la même problématique, Duta *et al.* [Duta *et al.* 2005] ont proposé une heuristique dite de 'piles égales'. Une heuristique multi-objectif pour concevoir une ligne en U a été proposée dans [Avikal *et al.* 2013]. Les auteurs ont considéré l'optimisation lexicographique de plusieurs critères déjà introduits dans [Güngör & Gupta 2002] : minimisation des temps morts, maximisation de la priorité de désassemblage des composants polluants et maximisation de la priorité de désassemblage des composants les plus demandés.

Deux méta-heuristiques multi-objectif : un système d'agents fourmis distribués et une recherche déterministe à information partielle (uninformed deterministic search) ont été présentées et comparées dans [McGovern & Gupta 2005]. Deux autres méta-heuristiques, colonie de fourmis et algorithme génétique, ont été proposées respectivement dans [McGovern & Gupta 2006, Zhu *et al.* 2014] et [McGovern & Gupta 2007b]. Les critères d'optimisation y ont été également considérés lexicographiquement. Ding *et al.* [Ding *et al.* 2009, Ding *et al.* 2010b, Ding *et al.* 2010a] ont développé un algorithme de colonie de fourmis pour traiter le problème multi-objectif de conception des lignes de désassemblage. Les critères d'optimisation ont été considérés parallèlement. Pour la même pro-

blématiques, deux méta-heuristiques, recherche tabou et recuit simulé, ont été proposées respectivement dans [Kalayci & Gupta 2011] et [Kalayci *et al.* 2012].

Différentes approches méta-heuristiques ont été développées pour résoudre le problème d'équilibrage des lignes et séquençement des tâches de désassemblage : l'approche rivière dynamique, recherche tabou, colonie de fourmis et recuit simulé [Kalayci & Gupta 2013e], [Kalayci & Gupta 2014], [Kalayci & Gupta 2013c], [Kalayci & Gupta 2013d, Kalayci & Gupta 2013a, Kalayci & Gupta 2013b], respectivement. Pour ce même problème, une heuristique a été proposée par Lambert et Gupta [Lambert & Gupta 2005a]. Une comparaison qualitative et quantitative de différentes heuristiques et méta-heuristiques, entre autre algorithme glouton, heuristiques hybrides glouton/escalade de colline, glouton/2-opt et l'heuristique chasseur-tueur (hunter-killer), traitant le problème de conception des lignes de désassemblage a été présentée dans [McGovern & Gupta 2007a].

Des méthodes de résolution exactes ont été également proposées. Altekin *et al.* [Altekin *et al.* 2008] ont développé un programme linéaire dont l'objectif est de maximiser le profit d'une ligne de désassemblage. Les auteurs ont proposé un schéma d'approximation se basant sur la relaxation linéaire. Un graphe ET/OU a été utilisé pour modéliser les relations de précédence entre les tâches et les sous-assemblages. Koc *et al.* [Koc *et al.* 2009] ont considéré le problème de minimisation du nombre de postes de travail et ont développé deux approches de résolution exactes se basant respectivement sur la programmation linéaire mixte et la programmation dynamique. Les auteurs ont démontré l'avantage d'utiliser des graphes ET/OU comparé à l'utilisation de graphes de précédence simples.

D'autres travaux s'intéressent à l'intégration des problématiques de conception de réseaux de chaînes logistiques fermées et d'équilibrage des lignes de désassemblage. Deux programmes linéaires mixtes ont été proposés dans [Özceylan & Paksoy 2013, Özceylan *et al.* 2014] pour modéliser ce problème.

D'autres traitent les problèmes de conception et d'équilibrage des lignes de désassemblage sous défaillance des tâches de désassemblage. Une approche prédictive-réactive par la programmation linéaire entière a été proposée dans [Altekin & Akkan 2011] pour maximiser le profit généré par une ligne de désassemblage sous possibilité de défaillance de tâches. Güngör et Gupta [Güngör & Gupta 2001b] ont développé une heuristique pour traiter le cas de défaillance de tâches et minimiser le coût de désassemblage de composants défectueux. Le cas d'incertitude de la demande des produits en fin de vie a été étudié dans [Chica *et al.* 2013]. Celui d'incertitude du temps de cycle dans [Liu *et al.* 2013].

1.3.4 Automatisation

L'objectif de l'automatisation du processus de désassemblage est de le rendre plus efficace. Différents aspects de son automatisation ont été étudiés récemment. Ces études peuvent être classées essentiellement selon trois aspects. La configuration du système de désassemblage proposé : cellules flexibles [Wiendahl *et al.* 2001, Seliger *et al.* 2002, Torres *et al.* 2004] et lignes de désassemblage [Opalić *et al.* 2010, Minca *et al.* 2012a, Minca *et al.* 2012b, Filipescu *et al.* 2012]. Les outils et logiciels de planification des opérations de désassemblage [Kim *et al.* 2009b, Javorova *et al.* 2011, Popa *et al.* 2012, Schumacher & Jouaneh 2013, Weyrich & Wang 2013]. Les équipements et machines de désassemblage [Koppensteiner *et al.* 2013, Vongbunyong *et al.* 2013a, Vongbunyong *et al.* 2013b]

1.3.5 Ergonomie

Selon l'ANACT (Agence Nationale pour l'Amélioration des Conditions de Travail), l'ergonomie cherche à rassembler des connaissances sur le fonctionnement de l'homme en activité afin de l'appliquer à la conception des tâches, des machines, des outillages et des systèmes de production. Concernant les systèmes de désassemblage, la nature manuelle des tâches de désassemblage exige la considération des facteurs ergonomiques afin de concevoir des lignes de désassemblage qui puissent être utilisées avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité par le plus grand nombre d'opérateurs [Kazmierczak *et al.* 2005].

Parmi les travaux de recherche sur les aspects de l'ergonomie, nous avons rapporté les plus référencés [Kroll 1996, Kazmierczak *et al.* 2004, Kazmierczak *et al.* 2005, Kazmierczak *et al.* 2007, Tang & Zhou 2008, Dempsey *et al.* 2010, Youssif *et al.* 2011, Smith & Grenchus Jr. 2009, Md. Dawal *et al.* 2013].

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir introduit les différentes options de fin de vie d'un produit, nous avons montré le rôle essentiel joué par le processus de désassemblage dans la revalorisation des produits en fin de vie. Nous avons aussi montré la complexité du processus de désassemblage et présenté les différences principales entre une ligne d'assemblage et une ligne de désassemblage. Enfin, nous avons revu les travaux de la littérature les plus pertinents traitant les problématiques générales liées au désassemblage.

Chapitre 2

Prise en compte des incertitudes lors de la conception des lignes de production

Sommaire

2.1	Introduction	21
2.2	Conception des lignes de désassemblage	22
2.2.1	Temps de cycle	23
2.2.2	Graphe de précedence ET/OU	25
2.3	Conception des lignes de production sous incertitudes des durées opératoires des tâches	29
2.3.1	Durées incertaines des tâches d'assemblage	29
2.3.1.1	Modélisation par des lois de probabilité connues	29
2.3.1.2	Modélisation par des intervalles fermés	30
2.3.1.3	Modélisation par des nombres flous ou par des scénarios	30
2.3.2	Durées incertaines des tâches de désassemblage	31
2.4	Cas d'incertitudes étudiés pour la conception des lignes de désassemblage	31
2.4.1	Coût de recours de la ligne	32
2.4.2	Taux de service de la ligne	33
2.4.3	Moyennes des charges des postes de la ligne	33
2.5	Conclusion	34

2.1 Introduction

La première partie de ce chapitre est consacrée à la définition formelle de la problématique de conception des lignes de désassemblage étudiée dans ce mémoire. Dans la

deuxième, nous présentons les différents travaux traitant les incertitudes des durées opératoires des tâches lors de la conception des lignes de production. Nous les avons classés en deux catégories : les travaux étudiant les incertitudes des durées opératoires des tâches d'assemblage et ceux traitant les incertitudes des durées opératoires des tâches de désassemblage. La raison pour laquelle nous nous focalisons sur l'étude des incertitudes des durées opératoires des tâches est qu'elles constituent la conséquence directe ou indirecte des sources d'incertitudes citées précédemment.

Pour notre problématique de conception des lignes de désassemblage, nous présentons les trois cas d'incertitudes des durées opératoires qui sont étudiés dans ce mémoire. Tous les concepts nécessaires à la compréhension de la suite de ce manuscrit y sont exposés.

2.2 Conception des lignes de désassemblage

Une ligne de désassemblage peut être définie comme une succession de postes de travail liés par un système de transport (Figure 2.1). À chaque poste de travail est affecté un ensemble d'opérations à réaliser en un temps inférieur ou égal au temps de cycle. La valeur du temps de cycle, calculée à partir de la prévision des demandes des produits, des composants et des matières, définit la cadence de fonctionnement de la ligne. L'affectation des tâches de désassemblage aux postes de travail de la ligne doit respecter les contraintes technologiques de précedence entre les tâches et les sous-assemblages générés au cours du processus de désassemblage.

Concevoir une ligne de désassemblage est une décision stratégique. Une démarche générale de conception d'une ligne de production a été proposée dans [Finch 2008] et reportée dans [McGovern & Gupta 2011]. Cette démarche consiste en 5 étapes :

1. Recenser et identifier toutes les tâches possibles de désassemblage d'un produit, leurs relations de précedence ainsi que leurs durées opératoires.
2. Déterminer la valeur du temps de cycle afin de satisfaire la demande pour un horizon de planification donné.
3. Déterminer le nombre minimum théorique de postes de travail qui constitueraient la ligne à concevoir.
4. Affecter les tâches de désassemblage aux postes de travail déterminés.
5. Évaluer l'utilisation de la ligne conçue.

Cette démarche globale ne fixe pas un ordre chronologique de conception d'une ligne de désassemblage, mais indique plutôt les paramètres et les étapes généraux à établir en vue de la concevoir. Dans ce qui suit, nous commençons d'abord par une définition plus détaillée du temps de cycle, puis nous présentons le processus proposé dans ce mémoire

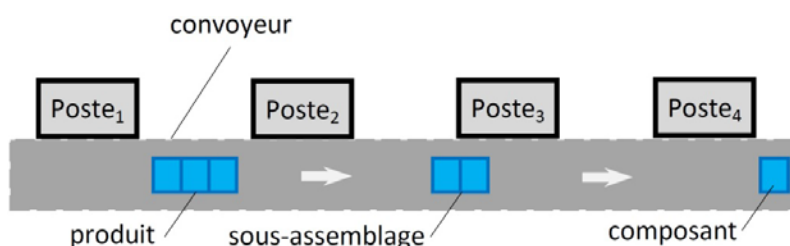


FIGURE 2.1 – Exemple d'une ligne de désassemblage.

pour la modélisation des relations de précédence entre les tâches de désassemblage et les sous-assemblages qui leur sont associés. Les autres paramètres seront introduits plus loin.

2.2.1 Temps de cycle

Le temps de cycle est le temps alloué à chaque poste de travail et durant lequel doivent être réalisées toutes les opérations de désassemblage qui lui sont affectées. Comme cité précédemment, le temps de cycle définit la cadence de production de la ligne. Une cadence plus élevée de la ligne correspond à un temps de cycle plus faible, un temps de cycle plus faible correspond à un nombre plus important de postes de travail.

Le temps de cycle, dans le cas de l'assemblage, est calculé comme la division du temps de la période de planification sur le nombre de produits finis demandés. Si, par exemple, la période de planification est d'un an, alors le temps de cycle est défini comme suit :

$$C_t = \frac{\text{temps de travail d'une année}}{\text{nombre de produits demandés de cette année}}$$

Le calcul du temps de cycle dans le cas du désassemblage est beaucoup plus complexe à cause des sources multiples de la demande. En effet, les demandes concernent à la fois les produits en fin de vie, leurs composants, leurs matières et leurs sous-assemblages. Pour définir, dans ce mémoire, la valeur du temps de cycle, nous retenons comme 'nombre de produits demandés par période de temps' la valeur de la demande d'un composant ou sous-assemblage qui correspond à un nombre de produits en fin de vie permettant la satisfaction des autres sources de demande.

Exemple

Prenons comme exemple de produit en fin de vie un ensemble piston-bielle, à 16 composants, illustré par la Figure 2.2 <<http://ga16ds.blogspot.fr>>. Pour simplifier, nous nous limitons à la considération des demandes en produits ainsi que leurs composants. Le principe de calcul étant le même pour le cas où les demandes concerneraient d'autres parties du produit.

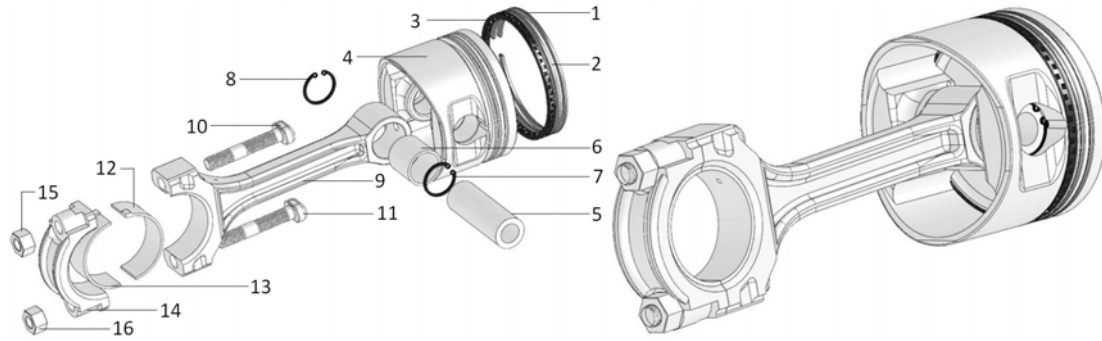


FIGURE 2.2 – Exemple d'un produit : piston-bielle.

TABLE 2.1 – Prévision sur une année des demandes d'un produit en fin de vie et ses composants.

Composant	Demande
0	87000
1-2	153220
3	90726
4	91000
5	85033
6	53988
7-8	134715
9	83312
10-11	152500
12-13	181490
14	77692
15-16	118310

Les détails des demandes sont reportés dans le Tableau 2.1 où les composants sont numérotés ; le numéro 0 représente le produit entier. Les composants identiques sont symbolisés avec un numéro composé : les composants numéros 15 et 16 représentent la même pièce, donc chacun est symbolisé par 15-16.

Considérons un horizon de planification d'une année de 52 semaines de 35 heures. Dans le Tableau 2.1, la plus grande demande (en valeur) enregistrée concerne le composant 12-13 : 181490 unités. Néanmoins, l'ensemble piston-bielle contient 2 pièces 12-13, ce qui revient à une demande de $181490/2 = 90745$ produits. Puisque la demande de la pièce 4 est de 91000 et que de l'ensemble piston-bielle on ne peut récupérer qu'une seule pièce de ce type, il s'ensuit que la demande maximale à considérer dans le calcul du temps de cycle est celle du composant 4 :

$$C_t = \frac{\text{temps de travail d'une année}}{\text{nombre de produits demandés de cette année}} = \frac{52 \times 35 \times 60}{91000} = 1.2 \text{ mn/produit.}$$

La valeur $C_t = 1.2$ mn/produit signifie concrètement que sur la ligne à concevoir, un ensemble piston-bielle est désassemblé chaque 72 secondes en vue de satisfaire la demande prévisionnelle.

2.2.2 Graphe de précedence ET/OU

Pour désassembler un produit, il est nécessaire d'identifier toutes les manières possibles de le faire afin d'en choisir la meilleure selon l'objectif recherché. Un produit peut être désassemblé en réalisant un certain nombre de tâches de désassemblage. Chaque tâche est ainsi caractérisée par sa durée opératoire *estimée*.

Des contraintes topologiques et techniques entre les différents composants du produit existent. Par exemple, si nous considérons le produit illustré dans la Figure 2.2, il n'est pas possible de récupérer les deux pièces numéros 12 et 13 avant de dévisser les pièces numéros 10, 11, 15 et 16. Ces différentes contraintes physiques créent ce que l'on appelle : *contraintes de précedence* entre les tâches et les sous-assemblages d'un produit.

Pour représenter explicitement toutes les alternatives de désassemblage, nous avons opté pour les graphes ET/OU connus dans la littérature sous l'appellation AND/OR graphes [Lambert 1999, Koc *et al.* 2009]. Nous avons adapté ce graphe pour prendre en compte le cas du désassemblage partiel.

Afin de présenter le processus de modélisation de toutes les alternatives de désassemblage d'un produit ainsi que les relations de précedence associées, nous prenons comme exemple le produit de la Figure 2.2. Le graphe ET/OU de la Figure 2.3 représente explicitement toutes ces alternatives ainsi que les relations de précedence correspondantes. C'est un graphe orienté sans circuit, il est biparti. Ce graphe est construit comme suit :

chaque tâche de désassemblage est représentée par un sommet $B_i, i \in I$, où I est l'ensemble de toutes les tâches de désassemblage. Les sommets B_i définissent le premier type de sommets du graphe ET/OU. Chaque sous-assemblage du produit est représenté par un sommet $A_k, k \in K$, où K est l'ensemble de tous les composants et sous-assemblages générés par les opérations de désassemblage. Les sommets A_k définissent le deuxième type de sommets. Pour simplifier, les composants (c.-à-d. sous-assemblages composés d'une seule pièce) ne sont pas explicitement représentés dans le graphe ET/OU. Le sommet puits s est rajouté pour modéliser le cas du désassemblage partiel.

Les relations de précedence entre les tâches et les différentes parties du produit sont représentées par les arcs du graphe ET/OU qui sont de deux types : des arcs ET et des arcs OU. Les arcs ET sont mis en gras dans la Figure 2.3.

Par exemple, pour commencer le désassemblage du produit (représenté par le sommet A_0),

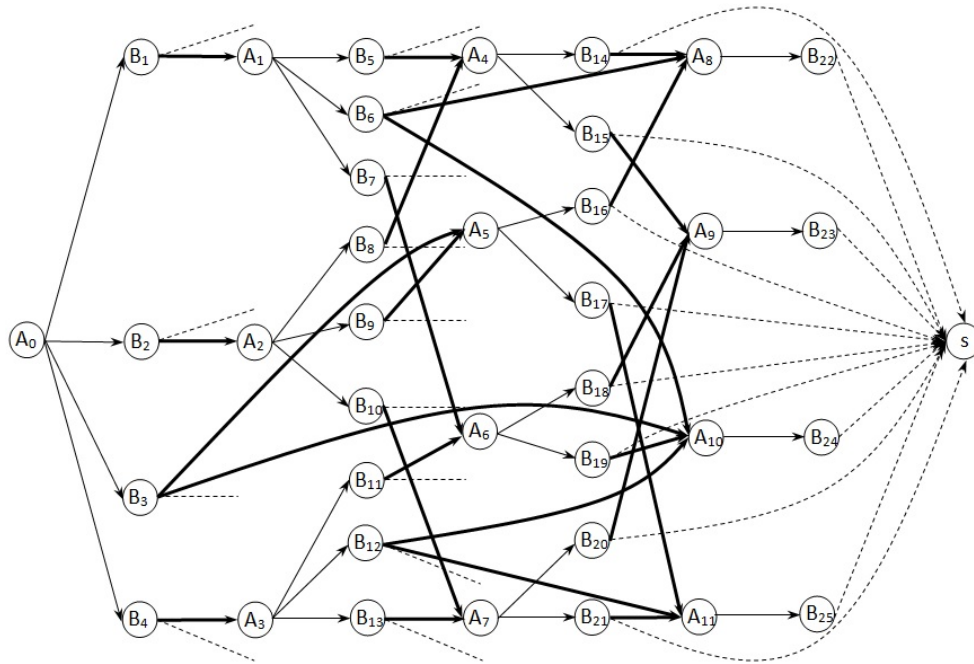


FIGURE 2.3 – Le graphe ET/OU du piston-bielle.

TABLE 2.2 – Les tâches de désassemblage du produit avec les composants et sous-assemblages générés ainsi que leurs durées opératoires associées en secondes.

tâche	s-assemblages	composants	durée	tâche	s-assemblages	composants	durée
1	1:9,11,14,16	10;12;13;15	40	14	9,11,14,16	4;5;6;7;8	51
2	4:16	1;2;3	51	15	4:9	11;14;16	63
3	1:4,9:16	5;6;7;8	32	16	9,11,14,16	10;12;13;15	40
4	1:9,10,14,15	11;12;13;16	32	17	9,10,14,15	11;12;13;16	49
5	4:9,11,14,16	1;2;3	44	18	4:9	1;2;3	41
6	1:4,9,11,14,16	5;6;7;8	44	19	1:4	5;6;7;8;9	35
7	1:9	11;14;16	31	20	4:9	11;14;15	45
8	4:9,11,14,16	10;12;13;15	37	21	9,10,14,15	4;5;6;7;8	37
9	9:16	4;5;6;7;8	53	22	–	9;11;14;16	41
10	4:9,10,14,15	11;12;13;16	40	23	–	4;5;6;7;8;9	60
11	1:9	10;14;15	40	24	–	1;2;3;4	57
12	1:4,9,10,14,15	5;6;7;8	51	25	–	9;10;14;15	48
13	4:9,10,14,15	1;2;3	43	-	-	-	-

la tâche B_1 peut être choisie, *ou* la tâche B_2 , *ou* la tâche B_3 , *ou* la tâche B_4 . En effet, les arcs OU modélisent les différentes options disponibles pour désassembler un sous-assemblage. Si la tâche B_3 est choisie, alors le sous-assemblage 1:4 *et* le sous-assemblage 9:16 ainsi que les composants 5;6;7;8 sont générés (Tableau 2.2). Les sous-assemblages 1:4 et 9:16 sont représentés respectivement par les sommets A_5 et A_{10} dans le graphe de la Figure 2.3; les composants 5;6;7;8 ne sont pas représentés dans le graphe ET/OU mais sont indiqués dans le Tableau 2.2.

La Figure 2.4 illustre un exemple d'un processus de désassemblage complet du produit. Il contient les tâches B_3, B_{16}, B_{22} et B_{24} . Si pour des raisons économiques seules les tâches B_3, B_{16} et B_{24} peuvent être sélectionnées, alors le désassemblage sera partiel (Figure 2.5). Soient :

t_i : la durée opératoire estimée de la tâche $B_i, i \in I$.

S_{dop} : la somme des durées opératoires des tâches de désassemblage choisies :

$$S_{\text{dop}} = \sum_{i \in I, i \text{ choisie}} t_i.$$

N_{pth} : nombre minimum théorique de postes de travail qui constitueraient la ligne de désas-

$$\text{semblage : } N_{\text{pth}} = \left\lceil \frac{S_{\text{dop}}}{C_t} \right\rceil.$$

N_{post} : le nombre de postes de travail qui constituent la ligne de désassemblage.

$$J : J = \{1, 2, \dots, N_{\text{post}}\}.$$

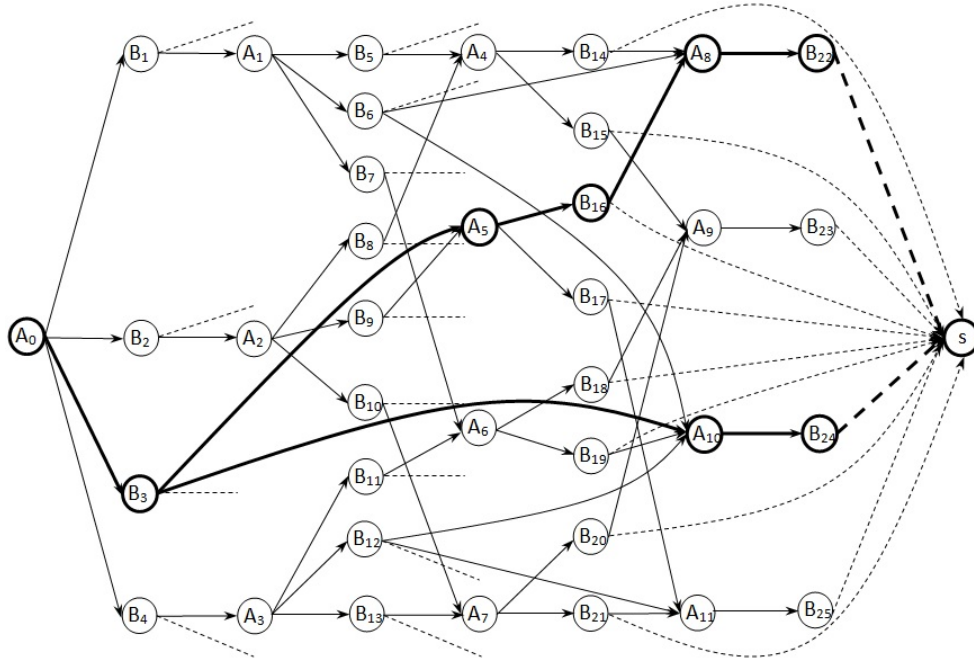


FIGURE 2.4 – Un exemple d'alternative de désassemblage complet.

t_{ij} : la durée opératoire de la tâche $B_i, i \in I$, affectée au poste $j, j \in J$.

TP_j : la somme des durées opératoires des tâches affectées au poste de travail $j, j \in J$:

$$TP_j = \sum_{i \in I, i \text{ choisie}} t_{ij}.$$

T_{prodl} : le temps de production de la ligne de désassemblage : $T_{\text{prodl}} = N_{\text{post}} \times C_t$.

U_l : taux d'utilisation de la ligne de désassemblage : $U_l = \frac{S_{\text{dop}}}{T_{\text{prodl}}}$.

T_{ml} : temps mort ou d'inactivité total de la ligne de désassemblage :

$$T_{\text{ml}} = \sum_{j \in J} (C_t - TP_j).$$

Pour l'exemple de l'alternative de la Figure 2.4, on a :

$$S_{\text{dop}} = \sum_{i \in I} t_i = 32 + 40 + 41 + 57 = 170 \text{ secondes.}$$

$$N_{\text{pth}} = \left\lceil \frac{S_{\text{dop}}}{C_t} \right\rceil = \left\lceil \frac{170}{72} \right\rceil = \left\lceil 2.36 \right\rceil = 3 \text{ postes au moins.}$$

Notons que les tâches B_3, B_{16}, B_{22} et B_{24} peuvent être affectées aux N_{pth} postes de travail sans violation des contraintes de précédence et celles du temps de cycle. Effectivement, il est possible d'affecter les deux tâches B_3 et B_{16} au poste n°1 ($TP_1 = t_3 + t_{16} = 32 + 40 = 72 = C_t$), la tâche B_{22} au poste n°2 ($TP_2 = 41 < 72$) et la tâche B_{24} au poste n°3 ($TP_3 = 57 < 72$). Les deux tâches B_{22} et B_{24} ne peuvent pas être affectées ensemble au poste n°2 car $t_{22} + t_{24} = 98 > 72$. Ainsi :

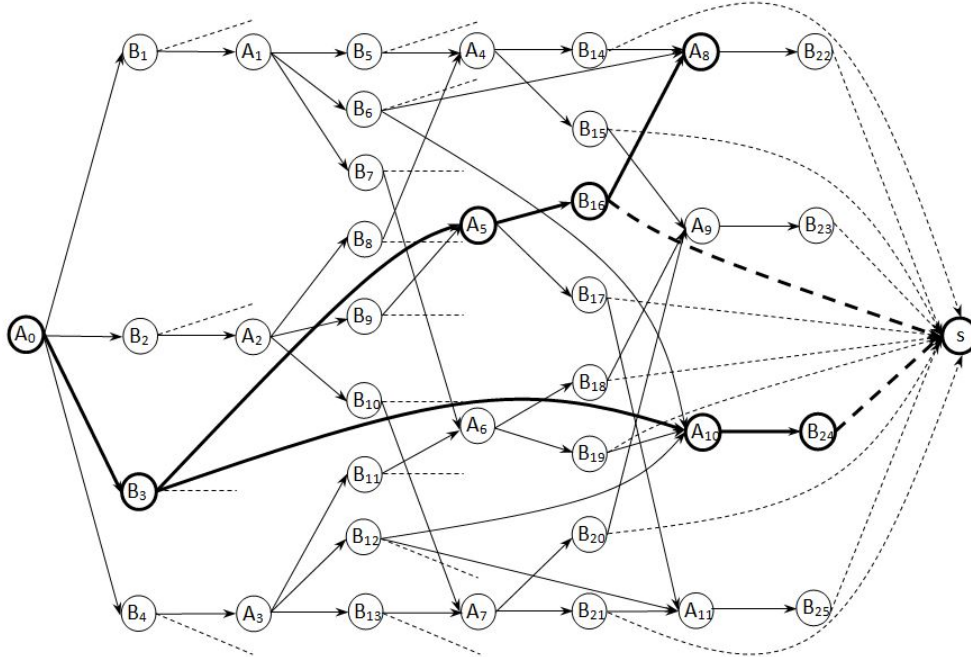


FIGURE 2.5 – Un exemple d'alternative de désassemblage partiel.

$$N_{\text{post}} = N_{\text{pth}} = 3$$

$$T_{\text{prodl}} = N_{\text{post}} \times C_t = 3 \times 72 = 216 \text{ secondes}$$

$$U_1 = \frac{S_{\text{dop}}}{T_{\text{prodl}}} = \frac{170}{216} = 78.7\%$$

La valeur $U_1 = 78.7\%$ revient à dire qu'au moins 21% du temps, la ligne sera inactive. Cette même information est reflétée par l'analyse du temps mort T_{ml} de la ligne :

$$T_{\text{ml}} = \sum_{j \in J} (C_t - TP_j) = (72 - 72) + (72 - 41) + (72 - 57) = 46 \text{ secondes}$$

2.3 Conception des lignes de production sous incertitudes des durées opératoires des tâches

Dans cette section, nous avons revu la quasi-totalité des travaux de la littérature qui traitent le problème de conception des lignes de production sous incertitudes des durées opératoires des tâches. Les lignes de production considérées sont celles d'assemblage et de désassemblage.

2.3.1 Durées incertaines des tâches d'assemblage

2.3.1.1 Modélisation par des lois de probabilité connues

La plupart des travaux de la littérature, traitant les incertitudes des durées opératoires des tâches d'assemblage, appartiennent à cette sous-catégorie.

Deux approches de résolution heuristique et exacte (énumérative, présentée dans [Johnson 1983]) ont été proposées, respectivement, dans [Raouf & Tsui 1982] et [Betts & Mahmoud 1989] pour concevoir puis équilibrer des lignes d'assemblage avec des durées opératoires aléatoires symétriques connues. Pour l'analyse et le calcul du temps mort global d'une ligne d'assemblage mixte, avec des durées aléatoires indépendantes et suivant des lois de probabilité identiques, les auteurs dans [Zhao *et al.* 2007] ont proposé une modélisation et approche de résolution se basant sur les chaînes de Markov.

Plusieurs travaux modélisant les durées opératoires des tâches comme des variables aléatoires de lois normales et connues ont été réalisés. Les premiers papiers ont été dédiés à la conception des lignes d'assemblage avec une configuration droite. Dans ce cas de figure, des méthodes de résolution heuristiques [Kao 1979, Carter & Silverman 1984, Silverman & Carter 1986, Chakravarty & Shtub 1986, Shin 1990, Lyu 1997, Fazlollahtabar *et al.* 2011], méta-heuristiques [Erel *et al.* 2005, Cakir *et al.* 2011] et exactes [Kao 1976, Henig 1986,

Sarin *et al.* 1999] ont été élaborées. Le cas d'une ligne avec des postes de travail en parallèle est étudié dans [McMullen & Frazier 1997]. L'optimisation des lignes en forme U est conduite dans [Guerriero & Miltenburg 2003, Chiang & Urban 2006, Baykasoglu & Özbakır 2007, Bagher *et al.* 2011, Özcan *et al.* 2011]. Deux approches heuristiques pour le problème de ré-équilibrage d'une ligne ont été développées dans [Gamberini *et al.* 2006, Gamberini *et al.* 2009]. Dans [Liu *et al.* 2005], les auteurs ont étudié le problème de minimisation du temps de cycle (maximisation de la cadence de la ligne).

Deux approches de résolution exacte et heuristique ont été proposées pour la résolution de programmes mathématiques avec des contraintes probabilisées disjointes, respectivement, pour le cas des lignes U [Urban & Chiang 2006, Ağpak & Gökçen 2007] et des lignes bilatérales [Özcan 2010].

2.3.1.2 Modélisation par des intervalles fermés

On suppose que la durée opératoire d'une tâche appartient à un intervalle $[a, b]$, $a < b$, $a, b \in \mathbb{R}_+$. Les valeurs a et b sont, respectivement, la valeur minimum et la valeur maximum de la durée de la tâche. Aucune probabilité ou loi de probabilité n'est associée à l'intervalle $[a, b]$.

Les articles qui traitent ce type d'incertitude sont peu nombreux. Les auteurs dans [Hazır & Dolgui 2013, Gurevsky *et al.* 2013a] ont proposé des modélisations et méthodes de résolution exactes. Deux analyses de stabilité des solutions faisables et optimales des problèmes de conception des lignes d'assemblage et sa version généralisée, ainsi que deux méthodes exacte et heuristique de résolution, avec possibilité de variations des durées opératoires de quelques tâches, ont été respectivement proposées dans [Gurevsky *et al.* 2012] et [Gurevsky *et al.* 2013b].

2.3.1.3 Modélisation par des nombres flous ou par des scénarios

Une durée opératoire d'une tâche est dite floue si sa valeur appartient à un sous-ensemble flou $\tilde{T} \subseteq \Omega$. Ce sous-ensemble est défini par sa fonction caractéristique ou d'appartenance $\mu: \Omega \rightarrow [0, 1]$; Ω est un ensemble infini indénombrable. Par exemple, pour une valeur donnée v , $\mu_{\tilde{T}}(v)$ représente le degré d'appartenance de v à \tilde{T} . Ce type d'incertitude des durées opératoires des tâches a été étudié dans [Zacharia & Nearchou 2012, Hop 2006, Tsujimura *et al.* 1995].

Pour le cas des scénarii, les durées opératoires d'une tâche sont définies suivant des scénarios (sans probabilités associées) préétablis par une planification sur un horizon donné. De telles incertitudes des durées opératoires ont été étudiées dans [Dolgui & Kovalev 2012, Xu & Xiao 2011, Xu & Xiao 2009].

2.3.2 Durées incertaines des tâches de désassemblage

Rares sont les travaux qui traitent le cas de conception des lignes de désassemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches.

Une modélisation par les réseaux flous colorés de Pétri et une méthode de résolution heuristique ont été proposées dans [Turowski & Morgan 2005] pour l'étude de l'impact du facteur humain causant des incertitudes des durées opératoires des tâches. Dans cette étude, les durées opératoires sont déterminées suivant un processus d'apprentissage.

Un algorithme de colonies de fourmis a été développé dans [Agrawal & Tiwari 2006] pour la conception et l'équilibrage des lignes de désassemblage mixtes en forme de U. Les durées opératoires ont été prises pour des lois normales indépendantes et connues. Pour ce même type d'incertitude, les auteurs dans [Aydemir-Karadag & Turkbey 2013] ont proposé un programme bi-objectif non linéaire pour concevoir une ligne de désassemblage avec possibilité de postes de travail en parallèle. Pour traiter le cas de durées opératoires floues, des approches de programmation mathématique ont été proposées dans [Özceylan & Paksoy 2014a, Özceylan & Paksoy 2014b].

2.4 Cas d'incertitudes étudiés pour la conception des lignes de désassemblage

Notre étude de la littérature nous a permis de constater que :

- les travaux existants ne sont pas capables de considérer simultanément les incertitudes des durées opératoires des tâches, le cas du processus partiel de désassemblage et la présence de matières dangereuses.
- les seules approches développées pour tenir compte des incertitudes des durées des tâches de désassemblage sont des méta-heuristiques qui ne fournissent pas l'information sur la qualité des solutions obtenues.
- de plus, les modélisations utilisées ne tiennent pas compte de la complexité des relations de précédence entre les tâches de désassemblage et les sous-assemblages générés lors du processus désassemblage.

Par conséquent, pour remédier à ces lacunes et fournir aux concepteurs de lignes de désassemblage des méthodes exactes tenant compte des incertitudes des durées opératoires des tâches, nous avons proposé trois modélisations mathématiques ainsi que les approches de résolution correspondantes. Les modèles proposés sont basés sur : 1) coût de recours de la ligne, 2) taux de service de la ligne et 3) les moyennes des charges de travail des postes de la ligne.

2.4.1 Coût de recours de la ligne

Comme introduit précédemment, $t_{ij}, i \in I, j \in J$, est la durée opératoire de la tâche $B_i, i \in I$, affectée au poste j et $TP_j, j \in J$, est la somme des durées opératoires des tâches affectées au poste de travail $j : TP_j = \sum_{i \in I} t_{ij}$. Le nombre de postes de travail constituant la ligne de désassemblage est $|J|$.

Supposons que les durées opératoires des tâches $t_{ij}, i \in I, j \in J$ soient des variables aléatoires avec des lois de probabilité connues qui sont notées $\tilde{t}_{ij}, i \in I, j \in J$. Les temps (ou charges) des postes de travail sont donc notés $\widetilde{TP}_j, j \in J$ où $\widetilde{TP}_j = \sum_{i \in I} \tilde{t}_{ij}$.

La contrainte du temps de cycle impose la réalisation des tâches affectées à un poste de travail dans la limite du temps C_t alloué à ce dernier. Cette contrainte doit être vérifiée pour chaque poste de travail $j \in J$, elle s'exprime comme suit :

$$\widetilde{TP}_j \leq C_t, j \in J$$

La contrainte ci-dessus impose la satisfaction de la limitation du temps de cycle sous incertitudes. Comme les durées réelles des tâches ne peuvent être connues qu'au moment de leur réalisation, la durée totale \widetilde{TP}_j des tâches initialement affectées à un poste $j \in J$ peut violer ou pas la contrainte du temps de cycle. Afin de mesurer la valeur du temps excédant le temps de cycle (s'il y a lieu) pour un poste $j \in J$, nous introduisons une variable aléatoire non négative $\tilde{y}_j, j \in J$ que nous appelons variable de *recours*. Ainsi, la contrainte du temps de cycle pour un poste $j \in J$ devient :

$$\widetilde{TP}_j - \tilde{y}_j \leq C_t, j \in J$$

Notre but est de satisfaire les contraintes du temps de cycle. Afin de minimiser les violations possibles de ces contraintes, un dépassement quelconque du temps de cycle pour un poste donné $j \in J$ sera pénalisé proportionnellement à la valeur $\tilde{y}_j, j \in J$ du temps de dépassement. Pour ce faire, nous introduisons un *coût de recours* par unité de temps $q_j, j \in J$ pour chaque poste de travail.

Le coût de recours d'un poste de travail $j, j \in J$ est défini par le produit $q_j \tilde{y}_j$. Le coût de recours de la ligne est donc :

$$\sum_{j \in J} q_j \tilde{y}_j$$

La minimisation du coût de recours permet la minimisation des arrêts de la ligne causés par les violations des contraintes du temps de cycle. Une autre variante qui peut être considérée aussi est celle de la minimisation du coût de recours maximum :

$$\max_{j \in J} q_j \tilde{y}_j$$

2.4.2 Taux de service de la ligne

Dans ce cas précis, un taux de service $(1 - \alpha)$ de la ligne est exigé. Il se traduit par un niveau de satisfaction de la demande des clients. En d'autres termes, on souhaite que la ligne soit opérationnelle à $[(1 - \alpha) \times 100]\%$ de son temps de fonctionnement global.

Supposons que les durées opératoires des tâches soient des variables aléatoires indépendantes, connues et suivant la loi de Gauss : $\tilde{t}_{ij}, i \in I, j \in J$. Alors, la satisfaction du taux de service de la ligne est modélisée par la satisfaction probabiliste conjointe des contraintes du temps de cycle comme suit :

$$P\left(\widetilde{TP}_j \leq C_t, \forall j \in J\right) \geq 1 - \alpha$$

Cette contrainte garantit un certain niveau de fonctionnement de la ligne et elle est liée à la notion du coût de recours de la ligne. En effet, pour le modèle avec les coûts de recours, le nombre de contraintes du temps de cycle qui sont satisfaites, c-à-d. des contraintes pour lesquelles $\tilde{y}_j = 0, j \in J$, divisé par le nombre total de contraintes du temps de cycle (ici $|J|$), peut être interprété comme le taux de service de la ligne.

2.4.3 Moyennes des charges des postes de la ligne

Afin d'aborder simultanément les problèmes de conception des lignes et de séquençement des tâches, les espérances des charges des postes de travail seront considérées.

Les durées opératoires des tâches sont prises pour des variables aléatoires avec des lois de probabilité connues $\tilde{t}_{ij}, i \in I, j \in J$. La contrainte du temps de cycle pour chaque poste $j \in J$ est exprimée comme suit :

$$\mathbb{E}\left(\widetilde{TP}_j\right) \leq C_t, j \in J$$

La relaxation lagrangienne sera utilisée pour traiter ce problème dans le chapitre 5. Dans ce même chapitre, une intégration des problèmes de conception des lignes et de séquençement des tâches de désassemblage sera également proposée.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini de manière formelle la problématique de conception des lignes de désassemblage et présenté le graphe orienté ET/OU. Ce graphe sera utilisé pour la modélisation des contraintes de précédence et toutes les alternatives de désassemblage d'un produit en fin de vie. Nous avons également analysé la littérature sur les incertitudes des durées opératoires des tâches dans le cas de la conception des lignes d'assemblage et de désassemblage. Nous avons mis en évidence les lacunes des travaux existants. Remédier à ces lacunes est l'objectif des chapitres 3, 4 et 5.

Nous verrons dans ces chapitres que tous les modèles et approches de résolution développés pour la conception des lignes de désassemblage peuvent être adaptés au cas d'assemblage.

Chapitre 3

Conception des lignes de désassemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches : méthode par génération de coupes

Sommaire

3.1	Introduction	35
3.2	Formulation du problème	36
3.2.1	Phase 1 : maximisation du profit de la ligne	36
	Complexité du problème	40
3.2.2	Phase 2 : équilibrage des charges de la ligne	41
3.3	Approche de résolution	43
3.3.1	Échantillonnage Monte Carlo simple	44
3.3.2	Échantillonnage latin hypercube	45
3.3.3	Résolution de la phase 1	45
	3.3.3.1 Décomposition de Benders	45
	3.3.3.2 Procédure d'approximation moyenne par échantillonnage	49
3.3.4	Résolution de la phase 2	55
3.4	Expérimentations et résultats d'optimisation	56
3.5	Conclusion	69

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, le problème de conception des lignes de désassemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches est étudié. Les durées opératoires sont considérées

comme des variables aléatoires avec des lois de probabilité connues. Pour résoudre ce problème, un programme stochastique est proposé. Ce dernier permet le choix de la meilleure alternative de désassemblage et l'affectation des tâches correspondantes aux postes de travail de la ligne.

L'objectif de l'optimisation est de maximiser le profit de la ligne qui est calculé comme la différence entre les revenus générés par les parties revendues du produit et le coût d'exploitation de la ligne. Les relations de précédence entre les tâches et les sous-assemblages sont modélisées par un graphe ET/OU introduit dans le chapitre 2. Une approche de résolution intégrant la décomposition de Benders (algorithme L-shaped) et la simulation Monte Carlo est proposée. Il est montré, dans ce chapitre, que sous certaines hypothèses, le problème traité peut être réduit à celui d'un assemblage. Par conséquent, la méthode de résolution proposée reste valable pour la conception des lignes d'assemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches.

Le problème d'équilibrage des charges pour la ligne issue de la résolution du problème de conception est également étudié. Une formulation de ce problème sous incertitudes des durées opératoires des tâches est proposée. En plus de l'équilibrage des charges des postes de désassemblage, son but est d'étudier l'impact de la ré-affectation des tâches sur le coût de recours de la ligne.

3.2 Formulation du problème

L'ensemble des tâches de désassemblage I doit être affecté aux postes de travail J de la ligne. Les contraintes de précédence sont définies par un graphe ET/OU, en conséquence de quoi, une seule alternative de désassemblage doit être choisie, c.-à-d. un sous-ensemble $I^* \subset I$; I^* contient les tâches de l'alternative de désassemblage retenue. Le niveau de désassemblage dépend du profit généré par la ligne.

Le processus d'optimisation est réalisé en deux phases : (1) d'abord, le nombre de postes de désassemblage maximisant le profit de la ligne ainsi que le processus de désassemblage sont déterminés ; (2) ensuite, certaines tâches peuvent être ré-affectées afin de permettre un meilleur équilibrage des charges des postes de désassemblage de la ligne.

Ces deux phases sont détaillées ci-dessous.

3.2.1 Phase 1 : maximisation du profit de la ligne

Les durées opératoires des tâches $t_i, i \in I$ sont supposées être des variables aléatoires indépendantes suivant des lois de probabilité connues. Elles sont représentées par un vecteur aléatoire $\tilde{\xi} = (\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \dots, \tilde{t}_{|I|})$ d'un ensemble $\Xi \subset \mathbb{R}_+^{|I|}$. En considérant un espace probabilisé (Ξ, \mathcal{F}, P) introduit par le vecteur $\tilde{\xi}$, posons $\tilde{t}_i = t_i(\tilde{\xi}), i \in I$.

Les hypothèses suivantes sont utilisées : un seul type de produit en fin de vie est à désassembler complètement ou partiellement sur une ligne cadencée. Tous les produits à traiter contiennent tous leurs composants initiaux sans rajout ni enlèvement. Certaines parties des produits contiennent des matières dangereuses ou polluantes et nécessitent un traitement spécial. Une tâche de désassemblage peut être réalisée par n'importe quel poste de travail mais ne peut pas être partagée entre deux postes. Chaque composant ou sous-assemblage d'un produit a une valeur de revente non négative mais peut être nulle. Un coût opérationnel fixe par unité de temps d'un poste de travail et un coût additionnel fixe par unité de temps d'un poste de travail traitant des matières dangereuses ou polluantes sont définis.

Dans ce qui suit, une tâche de désassemblage $i \in H \subset I$ est dite polluante si son exécution génère des composants, ou sous-assemblages ou matières dangereux ou polluants.

Afin de formuler le problème de conception d'une ligne de désassemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches, les notations suivantes sont introduites.

Paramètres

I : ensemble des indices des tâches de désassemblage : $I = \{1, 2, \dots, |I|\}$.

J : ensemble des indices des postes de travail : $J = \{1, 2, \dots, |J|\}$.

H : ensemble des indices des tâches polluantes.

L : ensemble des indices des parties désassemblées (composants et sous-assemblages) du produit : $L = \{1, 2, \dots, |L|\}$.

K : ensemble des indices des sous-assemblages générés : $K = \{0, 1, \dots, |K|\}$.

L_i : ensemble des indices des parties du produit désassemblées en exécutant la tâche $B_i, i \in I$.

A_k : un sous-assemblage, $k \in K$.

B_i : une tâche de désassemblage, $i \in I$.

s : la tâche fictive ou puits du graphe ET/OU.

P_k : ensemble des indices des prédécesseurs de $A_k, k \in K$, c.-à-d. $P_k = \{i \mid B_i \text{ précède } A_k\}$.

S_k : ensemble des indices des successeurs de $A_k, k \in K$, $S_k = \{i \mid A_k \text{ précède } B_i\}$.

r_l : revenu généré par la partie $l, l \in L$ du produit désassemblé.

F_c : coût opérationnel fixe par unité de temps d'un poste de travail, $F_c > 0$.

C_h : coût additionnel fixe par unité de temps des postes de travail traitant des matières dangereuses ou polluantes, $C_h > 0$.

q_j : coût de recours fixe par unité de temps pour le poste de travail $j, j \in J$. Notons que dans notre cas précis $q_j = q, \forall j \in J, q > 0$.

C_t : temps de cycle, $C_t > 0$.

Variables de décision

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la tâche } B_i \text{ est affectée} \\ & \text{au poste de travail } j; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad x_{sj} = \begin{cases} 1, & \text{si la tâche fictive } s \text{ est affectée} \\ & \text{au poste de travail } j; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$h_j = \begin{cases} 1, & \text{si une tâche polluante est affectée} \\ & \text{au poste de travail } j; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

Comme défini dans le chapitre précédent, une variable de recours $y_j(\tilde{\xi}), j \in J$ mesure le temps de dépassement de C_t s'il y a lieu. Pour le problème décrit ci-dessus, le programme stochastique Binaire Mixte avec Recours (**BMR**) suivant est développé.

Programme stochastique binaire mixte

$$\max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} - \left[C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) + \mathbb{E}_{\tilde{\xi}} \left(q \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi}) \right) \right] \right\} \quad (\text{BMR})$$

s.c.

$$\sum_{i \in S_0} \sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad (3.1)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1, \forall i \in I \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in S_k} \sum_{j \in J} x_{ij} \leq \sum_{i \in P_k} \sum_{j \in J} x_{ij}, \forall k \in K \setminus \{0\} \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in S_k} x_{iv} \leq \sum_{i \in P_k} \sum_{j=1}^v x_{ij}, \forall k \in K \setminus \{0\}, \forall v \in J \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in J} x_{sj} = 1 \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in J} j \cdot x_{ij} \leq \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj}, \forall i \in I \quad (3.6)$$

$$h_j \geq x_{ij}, \forall j \in J, \forall i \in H \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij} - y_j(\tilde{\xi}) \leq C_t, \forall j \in J \quad (3.8)$$

$$(x_{sj}, x_{ij}, h_j) \in \mathfrak{X} \subseteq \{0, 1\}^{|J| \cdot (|I|+2)} \quad (3.9)$$

$$y_j(\tilde{\xi}) \geq 0, \forall j \in J \quad (3.10)$$

Les termes de la fonction objectif représentent, respectivement, les revenus des produits désassemblés, le coût opérationnel des postes de travail, le coût de traitement des matières dangereuses ou polluantes et l'espérance mathématique du coût de recours de la ligne $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}$ suivant la distribution de $\tilde{\xi}$:

$$\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}\left(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi})\right) = \int_{\Xi} \left(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi})\right) dP \quad (3.11)$$

L'intégrale (3.11) rend non linéaire le programme (**BMR**).

Si la tâche fictive \mathbf{s} est affectée à un poste de travail j , alors j définit le nombre \mathbf{m}^* de postes de travail constituant la ligne de désassemblage. La contrainte (3.1) impose la sélection d'une seule tâche de désassemblage parmi les possibles (successeurs OU) pour commencer le processus de désassemblage. Les contraintes (3.2) indiquent qu'une tâche de désassemblage est à affecter au plus à un seul poste de travail. L'ensemble des contraintes (3.3) assure la sélection d'une seule tâche de désassemblage quand plusieurs sont possibles (successeurs OU). L'ensemble de contraintes (3.4) définit les relations de précédence entre les tâches et les sous-assemblages. La contrainte (3.5) impose l'affectation de la tâche fictive \mathbf{s} à un poste de travail. Les contraintes (3.6) assurent que toutes les tâches de désassemblage soient affectées à des postes de travail d'indices inférieurs ou égaux à celui du poste où la tâche \mathbf{s} est affectée. Les contraintes (3.7) assurent que h_j prenne la valeur 1 si au moins une tâche polluante est affectée au poste j ; $\sum_{j \in J} h_j$ représente le nombre total de postes traitant des matières dangereuses. Les contraintes (3.8) modélisent celles du temps de cycle. Comme mentionné précédemment, la variable $y_j(\tilde{\xi}), j \in J$ mesure le temps dépassant le temps de cycle C_t au niveau du poste j . Enfin, l'ensemble des contraintes (3.9), (3.10) représente les valeurs possibles des variables de décision.

Soit le cas spécial du problème (**BMR**) défini comme suit : les profits des produits désassemblés sont considérés comme nuls ($r_l = 0, \forall l \in L_i, \forall i \in I$), le produit est complètement désassemblé, une seule alternative de désassemblage existe et aucune tâche dangereuse n'existe ($H = \emptyset$). Alors, la fonction objectif de (**BMR**) devient :

$$\begin{aligned} \max & \left\{ -C_t \cdot F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} - \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}\left(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi})\right) \right\} = \\ & = -\min \left\{ C_t \cdot F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}\left(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi})\right) \right\} \end{aligned}$$

où le terme $\sum_{j \in J} j \cdot x_{sj}$ représente le nombre de postes de travail à installer. Noter qu'il n'y a plus d'arcs de type OU dans le graphe de précédence résultant. Le problème qui en résulte définit théoriquement celui de conception des lignes d'assemblage de type 1, (SALBP-1) avec des durées opératoires aléatoires et un coût de recours fixe. En effet, le

problème SALBP-1 est défini comme la minimisation du nombre de postes de travail sous contraintes de précédence simple (arcs de type ET seulement) et contraintes du temps de cycle.

Tout au long de ce chapitre, une approche de résolution du problème (**BMR**) sous forme de plusieurs algorithmes est développée. Des résultats ci-dessus, il s'ensuit que ces algorithmes seront aussi applicables pour le problème SALBP-1, sous incertitudes, avec recours fixe.

Ainsi, la complexité du problème (**BMR**) est établie ci-après.

Complexité du problème

Si de plus, pour le cas spécial du problème (**BMR**) défini ci-dessus, les durées opératoires des tâches de désassemblage sont considérées comme déterministes, alors, on définit un cas particulier qui peut être décrit par l'instance suivante :

un ensemble fini de tâches \mathcal{J} , des durées opératoires $t_i \in \mathbb{R}_*^+, i \in \mathcal{J}$, un ordre partiel \prec sur \mathcal{J} , un nombre $|\mathcal{J}| \in \mathbb{Z}^+$ de postes de travail et une capacité $\mathcal{C}_t \in \mathbb{R}_*^+$ de chaque poste. Cette instance définit celle du problème SALBP-1 [Baybars 1986]. Le problème SALBP-1 étant connu comme \mathcal{NP} -difficile [Baybars 1986, Becker & Scholl 2006]. Par restriction, il s'ensuit que le problème (**BMR**) est \mathcal{NP} -difficile.

Version déterministe équivalente du programme (**BMR**)

Soit Z l'ensemble de toutes les solutions possibles du programme (**BMR**). Le coût de recours d'une ligne de désassemblage ne peut qu'être positif ou nul et fini, d'où :

$$0 \leq \mathbb{E}_{\tilde{\xi}} \left(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi}) \right) < \infty$$

Puisqu'il y a au moins une possibilité d'affecter les tâches de désassemblage à une succession de postes de travail et le nombre d'affectations possibles est fini, c.-à-d. $Z \neq \emptyset$ et est fini, alors le programme (**BMR**) possède au moins une solution optimale.

Soient x le vecteur des variables de décision $x_{ij}, x_{sj}, h_j, \forall i \in I, \forall j \in J$, respectivement, et $X = \{x \mid \text{les contraintes (3.1)-(3.7) et (3.9) sont satisfaites}\}$.

Si $\tilde{\xi}$ définit une distribution discrète et finie $\{(\xi_\ell, p_\ell), \ell \in \mathcal{D}, p_\ell > 0, \forall \ell \in \mathcal{D}\}$, où $\mathcal{D} = \{1, 2, \dots, D\}$, $D \in \mathbb{N}^*$ et p_ℓ est la probabilité d'occurrence de ξ_ℓ de $\tilde{\xi}$, alors le programme (**BMR**) devient un programme linéaire ordinaire définissant une structure dite *décomposition duale*.

Le programme (**BMR-DS**) ci-dessous définit une version déterministe équivalente du programme (**BMR**) et montre sa structure particulière en blocs ; chaque programme (3.12) constitue un bloc. Le problème (**BMR-DS**) est en particulier un programme stochastique

binaire mixte en deux stages avec recours fixe [Bailey *et al.* 1999, Penuel *et al.* 2010]. Ce même programme, c.-à-d. (**BMR-DS**) sera utilisé dans la méthode de résolution proposée.

$$\begin{aligned}
& \max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} - \left[C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) + \mathcal{Q}^D(x) \right] \right\} \quad (\text{BMR-DS}) \\
& \text{s.c. } x \in X \\
& \text{où } \mathcal{Q}^D(x) = \sum_{\ell=1}^D p_\ell \cdot \mathcal{Q}(x, \xi_\ell) \\
& \text{et } \mathcal{Q}(x, \xi_\ell) = \min \left\{ \mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\xi_\ell) \mid \sum_{i \in I} t_i(\xi_\ell) \cdot x_{ij} - y_j(\xi_\ell) \leq C_t, y_j(\xi_\ell) \geq 0, \forall j \in J \right\}, \ell \in \mathfrak{D}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

La taille D du programme (**BMR-DS**) peut devenir très grande suivant le nombre de réalisations de $\tilde{\xi}$, mais sa structure particulière en blocs peut être exploitée efficacement par des algorithmes conçus spécialement pour ce genre de problèmes comme l'algorithme L-shaped [Ahmed & Shapiro 2002, Birge & Louveaux 1997]. La méthode L-shaped, proposée par Van Slyke et Wets [Van Slyke & Wets 1969], est une variante de la décomposition de Benders [Üster *et al.* 2007]. Le problème initial (**BMR**) est décomposé en un programme principal (stage 1) et sous-programmes (stage 2). Les variables de décision $x \in \mathfrak{X}$ du programme principal sont appelées variables principales et les variables de recours $y_j(\xi), \xi \in \Xi, \forall j \in J$ des variables auxiliaires ou secondaires.

3.2.2 Phase 2 : équilibrage des charges de la ligne

Dans la phase 1, un nombre de postes de travail $\mathfrak{m}^* \leq |J|$ (où $x_{\mathfrak{sm}^*} = 1$) et un sous-ensemble $I^* \subset I$ de tâches (une alternative de désassemblage) sont déterminés sous incertitudes des durées opératoires des tâches. Un exemple d'une telle alternative et un sous-ensemble I^* de tâches est illustré par la Figure 3.1. L'alternative (ou séquence ou processus de désassemblage) sélectionnée (en gras) est représentée par un graphe de précedence ET ; $I^* = \{\mathbf{B}_3, \mathbf{B}_{16}, \mathbf{B}_{24}\}$. Ainsi, seulement les relations de précedence entre les tâches peuvent être considérées, en supprimant les sous-assemblage $\mathbf{A}_0, \mathbf{A}_5, \mathbf{A}_8$ et \mathbf{A}_{10} . Le graphe de précedence de la Figure 3.2 est alors créée.

Dans la phase 2, un meilleur équilibrage des charges des postes de travail est recherché. En conséquence, les tâches choisies dans la phase 1 peuvent être réaffectée dans la phase 2 afin d'atteindre un meilleur équilibre.

Soient $J^* = \{1, 2, \dots, \mathfrak{m}^*\}$, $ST_j(\tilde{\xi}) = \sum_{i \in I^*} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij}, \forall j \in J^*$ et $\text{Pred}(i) = \{i' \in I^* \mid i' \text{ précède } i\}, i \in I^*$. Le Maximum des Espérances Mathématiques des différences de Charges entre tous les postes de travail est minimisé par le programme (**MEMC**) suivant :

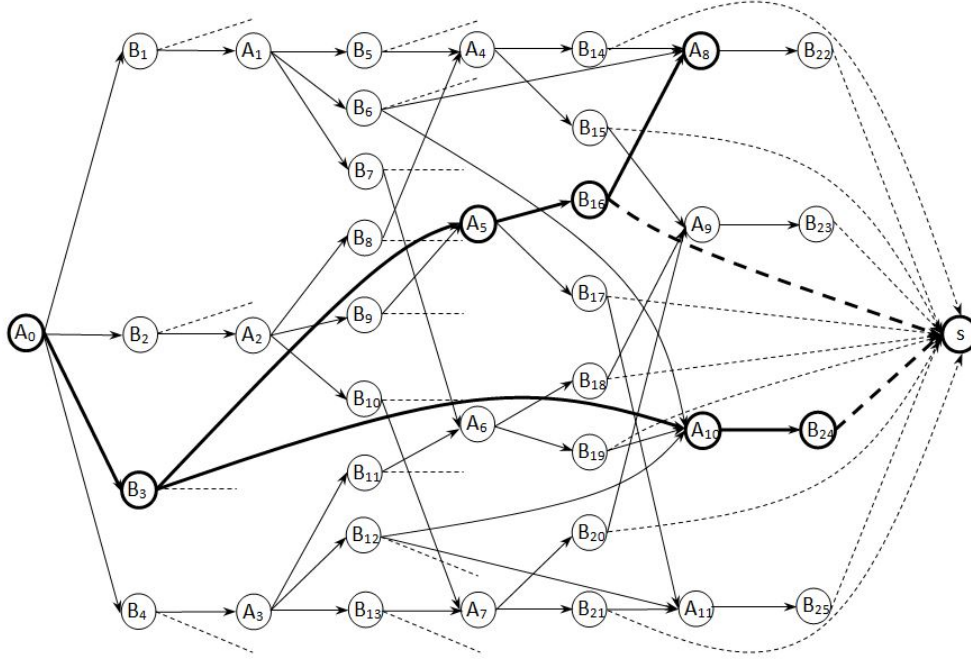


FIGURE 3.1 – Un exemple d'alternative de désassemblage choisie.

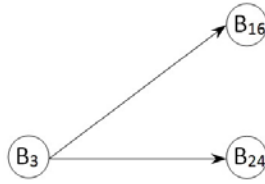


FIGURE 3.2 – Graphe de précedence simple issu de l'alternative de désassemblage choisie.

$$\min \max_{\forall j, j' \in J^*, j \neq j'} \mathbb{E}_{\tilde{\xi}} \left(\left| ST_j(\tilde{\xi}) - ST_{j'}(\tilde{\xi}) \right| \right) \quad (\text{MEMC})$$

s.c.

$$\sum_{j \in J^*} x_{ij} = 1, \forall i \in I^*$$

$$\sum_{j \in J^*} j \cdot x_{ij} \leq \sum_{j \in J^*} j \cdot x_{i'j}, \forall i \in I^*, \forall i' \in \text{Pred}(i)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I^*, \forall j \in J^*$$

Soit $\mathcal{B} = \{1, 2, \dots, B\}$, $B \in \mathbb{N}^*$ et $S_l(\tilde{\xi}) = \left(ST_j(\tilde{\xi}) - ST_{j'}(\tilde{\xi}), j, j' \in J^*, j \neq j' \right)$, $l \in \mathcal{B}$, où $B = \binom{2}{|J^*|}$; pour chaque valeur de l est associé un couple (j, j') , $j, j' \in J^*, j \neq j'$. Alors, le programme (**MEMC'**) ci-dessous représente une version équivalente du programme (**MEMC**).

min Y (MEMC')

s.c.

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J^*} x_{ij} &= 1, \forall i \in I^* \\ \sum_{j \in J^*} j \cdot x_{i'j} &\leq \sum_{j \in J^*} j \cdot x_{ij}, \forall i \in I^*, \forall i' \in \text{Pred}(i) \\ Y &\geq \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(|\mathbf{s}_l(\tilde{\xi})|), \forall l \in \mathcal{B} \\ x_{ij} &\in \{0, 1\}, \forall i \in I^*, \forall j \in J^* \\ Y &\geq 0 \end{aligned}$$

Il est à noter que le coût de recours moyen $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(\mathbf{q} \cdot y_j(\tilde{\xi}))$ pour chaque poste de travail $j, j \in J^*$, peut être modifié par la ré-affectation des tâches I^* aux postes \mathbf{m}^* lors de cette phase d'équilibrage des charges. Ainsi, $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi}))$ peut augmenter ou diminuer. Par mesure de sécurité, aucune ré-affectation des tâches polluantes n'est considérée.

Soient x, x' des solutions optimales des problèmes (BMR) et (MEMC), respectivement, et $\mathcal{Q}^D(x)$ et $\mathcal{Q}^D(x')$ les coûts de recours moyens correspondants. La solution x' est retenue si

$$\eta = \frac{\mathcal{Q}^D(x') - \mathcal{Q}^D(x)}{\mathcal{Q}^D(x)} \times 100 \leq \varrho$$

Sinon, x' n'est pas considérée et x est retenue ; ϱ est un pourcentage fixé par le décideur. Autrement dit, x' est préférée à x si l'augmentation du coût de recours dans la phase 2 ne dépasse pas un certain pourcentage (ϱ) fixé par le décideur.

L'approche de résolution proposée est détaillée dans la section suivante.

3.3 Approche de résolution

Pour une affectation donnée des tâches de désassemblage aux postes de travail de la ligne, le calcul de l'espérance mathématique $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi}))$ est difficile, car il requiert des intégrations numériques de fonctions, de densités de probabilités, des variables $y_j(\xi), \xi \in \Xi, \forall j \in J$ définies implicitement, comme indiqué par l'équation (3.11). Même pour une distribution discrète de $\tilde{\xi}$, le nombre de programmes linéaires de type (3.12) à résoudre peut exploser. Et même si le calcul exacte de l'espérance mathématique dans (BMR) s'avère possible, son optimisation présente de sérieuses difficultés [Birge 1997, Santoso *et al.* 2005]. En effet, $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi}))$ est définie implicitement.

Dans ce travail, en vue de contourner ces difficultés, l'approche d'Approximation Moyenne par Échantillonnage (AME), en anglais the Sample Average Approximation

(SAA) method [Kleywegt *et al.* 2001], est utilisée. Cette approche de résolution intègre la simulation Monte Carlo introduite dans les sous-sections 3.3.1 et 3.3.2, et l'algorithme L-shaped introduit dans la sous-section 3.3.3.

3.3.1 Échantillonnage Monte Carlo simple

Comme mentionné précédemment, les durées opératoires des tâches de désassemblage sont modélisées avec un vecteur aléatoire $\tilde{\xi}$ qui prend ses valeurs dans l'ensemble $\Xi \subset \mathbb{R}_+^{|I|}$ d'un espace de probabilité (Ξ, \mathcal{F}, P) introduit par $\tilde{\xi}$. L'intégrale :

$$\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}\left(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi})\right) = \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})] = \int_{\Xi} \left(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi})\right) dP$$

représente l'espérance mathématique $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]$ de la fonction

$$\mathcal{Q}(x, \xi) = \min \left\{ \mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\xi) \mid \sum_{i \in I} t_i(\xi) \cdot x_{ij} - y_j(\xi) \leq C_i, y_j(\xi) \geq 0, \forall j \in J \right\}, \xi \in \Xi$$

Une estimation Monte Carlo $\mathcal{Q}^\lambda(x)$ de la valeur moyenne $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]$ est obtenue par une génération d'un échantillon $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_\lambda)$ de taille λ du vecteur aléatoire $\tilde{\xi}$ en utilisant les nombres pseudo-aléatoires :

$$\mathcal{Q}^\lambda(x) = \frac{1}{\lambda} \sum_{\ell=1}^{\lambda} \mathcal{Q}(x, \xi_\ell)$$

La variable aléatoire $\mathcal{Q}^\lambda(x, \tilde{\xi})$ définie par

$$\mathcal{Q}^\lambda(x, \tilde{\xi}) = \frac{1}{\lambda} \sum_{\ell=1}^{\lambda} \mathcal{Q}(x, \tilde{\xi}_\ell)$$

représente l'estimateur Monte Carlo de $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]$. C'est un estimateur non biaisé de $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]$:

$$\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}^\lambda(x, \tilde{\xi})] = \mathbb{E}\left(\frac{1}{\lambda} \sum_{\ell=1}^{\lambda} \mathcal{Q}(x, \tilde{\xi}_\ell)\right) = \frac{1}{\lambda} \sum_{\ell=1}^{\lambda} \mathbb{E}(\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi}_\ell)) = \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]$$

De la loi faible des grands nombres, pour une petite valeur quelconque ε , on a :

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} P\left(\left|\mathcal{Q}^\lambda(x, \tilde{\xi}) - \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]\right| \geq \varepsilon\right) = 0$$

Cette loi indique que pour un échantillon de grande taille λ et pour tout nombre positif ε aussi petit soit il, la probabilité que $\mathcal{Q}^\lambda(x, \tilde{\xi})$ s'écarte considérablement de $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]$ est faible. La loi forte des grands nombres

$$P\left(\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \mathcal{Q}^\lambda(x, \tilde{\xi}) = \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]\right) = 1$$

stipule que $\mathcal{Q}^\lambda(x, \tilde{\xi})$ converge presque sûrement (avec probabilité 1) vers l'espérance mathématique $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]$.

En appliquant le théorème centrale limite [DeGroot & Schervish 2012], quand $\lambda \rightarrow \infty$, on a :

$$\frac{\mathcal{Q}^\lambda(x, \tilde{\xi}) - \mu_{\mathcal{Q}}}{\sqrt{\sigma_{\mathcal{Q}}^2/\lambda}} \rightsquigarrow \mathcal{N}(0, 1)$$

où $\mu_{\mathcal{Q}}$ et $\sigma_{\mathcal{Q}}^2$ sont, respectivement, la moyenne et la variance de $\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})$.

Ainsi, l'Échantillonnage Monte Carlo Simple (EMCS) génère un échantillon aléatoire du vecteur $\tilde{\xi} = (\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \dots, \tilde{t}_{|I|})$ en utilisant les nombres pseudo-aléatoires et en échantillonnant l'intervalle de chaque variable aléatoire $\tilde{t}_i, i = 1, 2, \dots, |I|$. Puis, la variable aléatoire $\mathcal{Q}^\lambda(x, \tilde{\xi})$ est utilisée pour calculer une estimation $\mathcal{Q}^\lambda(x)$ de l'espérance du coût de recours $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]$.

3.3.2 Échantillonnage latin hypercube

C'est une autre technique Monte Carlo pour l'échantillonnage des intervalles des variables aléatoires. Sous l'hypothèse d'indépendance des variables aléatoires, l'Échantillonnage Latin Hypercube (ELH) génère un échantillon de taille Λ de $\tilde{\xi} = (\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \dots, \tilde{t}_{|I|})$ suivant l'espace de probabilité (Ξ, \mathcal{F}, P) [Helton & Davis 2003].

L'intervalle de chaque variable $\tilde{t}_i, i = 1, 2, \dots, |I|$ est divisé en Λ sous-intervalles de probabilités identiques et une valeur est choisie aléatoirement de chaque sous-intervalle. Puis, les valeurs au nombre de Λ obtenues pour \tilde{t}_1 sont couplées aléatoirement sans remplacement avec les valeurs au nombre de Λ obtenues pour \tilde{t}_2 . Ces couples au nombre de Λ obtenus sont combinés aléatoirement sans remplacement avec les valeurs de \tilde{t}_3 au nombre de Λ pour former des triplets. Ce processus continue jusqu'à l'obtention d'un ensemble de Λ $|I|$ -uplets. Ces $|I|$ -uplets constituent l'échantillon latin hypercube (ELH).

3.3.3 Résolution de la phase 1

3.3.3.1 Décomposition de Benders

L'idée de la décomposition de Benders (l'algorithme L-shaped) est d'approximer le terme non linéaire $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}\left(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi})\right)$ de la fonction objectif du programme stochastique avec recours fixe (BMR). Le recours fixe est dit *recours complet* si pour n'importe quelles valeurs des variables de décision principales x et n'importe quelle réalisation ξ du vecteur $\tilde{\xi}$, le sous-programme (3.12) reste toujours faisable [Kall & Wallace 1994]. En particulier,

il est dit *recours simple* si la matrice définie par les coefficients des variables de recours du programme (3.12) peut s'écrire sous la forme $(\mathbf{I}, -\mathbf{I})$, où \mathbf{I} représente la matrice identité. L'intérêt de ces caractéristiques intéressantes réside dans la simplification de la résolution du programme (BMR), notamment la suppression de l'étape de faisabilité dans l'algorithme L-shaped.

Le théorème suivant a été élaboré pour le programme (BMR-DS), et donc pour le programme (BMR).

Théorème. *Le programme (BMR-DS) définit un recours complet, de plus, ce recours est simple. Autrement dit :*

$$\mathcal{A} = \{a | a = Wy = \mathbf{I}y' - \mathbf{I}y, y, y' \geq 0\} = \mathbb{R}^{|J|}$$

où $\mathcal{Q}(x, \xi) = \min \{q^\top y | \mathbf{I}y' - \mathbf{I}y = h(\xi) - T(\xi) \cdot x, y, y' \geq 0\}, \forall \xi \in \Xi$

représente la formulation matricielle des sous-programmes du second stage ; $q = (q, \dots, q)^\top$,

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & 1 \end{pmatrix}, h(\xi) = (C_t, \dots, C_t)^\top \text{ et } T(\xi) = \begin{pmatrix} t_1 & \dots & t_{|I|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_1 & \dots & t_{|I|} \end{pmatrix}, \forall \xi \in \Xi$$

représentent, respectivement, le vecteur de recours, la matrice identité, le vecteur temps de cycle est la matrice technologique.

Démonstration. $\forall x \in X, \forall \xi \in \Xi$ on a :

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} t_i(\xi) \cdot x_{ij} - y_j(\xi) \leq C_t &\iff \sum_{i \in I} t_i(\xi) \cdot x_{ij} - y_j(\xi) + y'_j(\xi) = C_t \\ &\iff y'_j(\xi) - y_j(\xi) = C_t - \sum_{i \in I} t_i(\xi) \cdot x_{ij} \\ y_j(\xi), y'_j(\xi) &\geq 0, \forall j \in J \end{aligned}$$

Vu que $y_j(\xi), y'_j(\xi) \geq 0, \forall j \in J, \forall \xi \in \Xi$, alors $\forall j \in J, \forall \xi \in \Xi, y'_j(\xi) - y_j(\xi) \in \mathbb{R}$. □

Du théorème ci-dessus, il s'ensuit que $\forall \xi \in \Xi, \forall x \in X$, le sous-programme

$$\mathcal{Q}(x, \xi) = \min \left\{ q \cdot \sum_{j \in J} y_j(\xi) \mid \sum_{i \in I} t_i(\xi) \cdot x_{ij} - y_j(\xi) \leq C_t, y_j(\xi) \geq 0, \forall j \in J \right\} \text{ est toujours réalisable.}$$

Du fait que le problème d'optimisation traité dans l'algorithme L-shaped soit une minimisation et puisque :

$$\max f(x) = - \min (-f(x))$$

où $f(x)$ est une fonction de variables de décision x , afin de résoudre le programme (BMR), sa version de minimisation

$$\min \left\{ \mathbf{C}_t \left(\mathbf{F}_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + \mathbf{C}_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} \mathbf{r}_l \cdot x_{ij} + \mathbb{E}_{\tilde{\xi}} \left(\mathbf{q} \cdot \sum_{j \in J} y_j(\tilde{\xi}) \right) \right\} \quad (3.13)$$

est utilisée. Ainsi, la valeur optimale de **(BMR)** est la valeur symétrique de (3.13).

Considérons la version de minimisation du programme **(BMR)** et la formulation matricielle ci-dessous du programme **(BMR-DS)** :

$$\min \{ \mathbf{c}^\top x + \mathcal{Q}^\mathbf{D}(x), x \in X \}$$

$$\text{où } \mathcal{Q}^\mathbf{D}(x) = \sum_{\ell=1}^{\mathbf{D}} p_\ell \cdot \mathcal{Q}(x, \xi_\ell)$$

$$\text{et } \mathcal{Q}(x, \xi_\ell) = \min \{ \mathbf{q}^\top \mathbf{y} \mid W\mathbf{y} = \mathbf{h}_\ell - T(\xi_\ell)x, \mathbf{y} \geq 0 \}$$

$$\text{où } \mathbf{c}^\top x = \mathbf{C}_t \left(\mathbf{F}_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + \mathbf{C}_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} \mathbf{r}_l \cdot x_{ij}$$

et $\mathbf{h}_\ell = (\mathbf{C}_t, \dots, \mathbf{C}_t)^\top, \forall \ell \in \mathfrak{D}$.

Dans l'algorithme L-shaped qui suit, les compteurs \mathbf{h} et v sont utilisés respectivement pour les coupes d'optimalité et les itérations de l'algorithme ; E_ν et e_ν sont définis au sein de l'algorithme.

Une nouvelle variable φ est introduite dans la fonction objectif du programme principal. La valeur de cette variable satisfait l'inégalité $\varphi \geq \mathcal{Q}^\mathbf{D}(x)$. Du fait que $\mathcal{Q}^\mathbf{D}(x)$ est définie implicitement par un grand nombre de problèmes d'optimisation, le programme principal n'est pas directement résolu avec cette inégalité. L'algorithme L-shaped approxime l'intégrale (3.11) et procède comme montré dans l'algorithme 1.

- 1 Faire $h = v = 0$
- 2 Faire $v = v + 1$. Résoudre le programme principal :

$$\begin{aligned}
& \min \{c^\top x + \varphi\} \\
& \text{s.c.} \\
& x \in X \\
& E_\nu \cdot x + \varphi \geq e_\nu, \nu = 1, 2, \dots, h \\
& x \text{ binaire}, \varphi \geq 0
\end{aligned} \tag{3.14}$$

- 3 Soit (x^v, φ^v) une solution optimale.
- 4 Pour $\ell = 1, 2, \dots, D$, résoudre le sous-programme :

$$\begin{aligned}
& \min \mathcal{W} = q^\top \cdot y \\
& \text{s.c.} \\
& Wy = \bar{h}_\ell - T(\xi_\ell) \cdot x^v \\
& y \geq 0
\end{aligned}$$

- 5 Soit ω_ℓ^v les multiplicateurs du simplex associés à une solution optimale
- 6 d'un programme ℓ ci-dessus ; définir :

$$E_{h+1} = \sum_{\ell \in \mathcal{D}} p_\ell \cdot (\omega_\ell^v)^\top \cdot T_\ell$$

et

$$e_{h+1} = \sum_{\ell \in \mathcal{D}} p_\ell \cdot (\omega_\ell^v)^\top \cdot \bar{h}_\ell$$

- 7 Soit $\theta^v = e_{h+1} - E_{h+1} \cdot x^v$. Si $\varphi^v \geq \theta^v$, stop : x^v est une solution optimale.
- 8 Sinon, générer une *coupe d'optimalité* de type (3.14), faire $h = h + 1$, rajouter
- 9 la contrainte de type (3.14) et retourner à la ligne 2.

Algorithme 1: Approximation de l'espérance mathématique du coût de recours de la ligne de désassemblage par la décomposition de Benders ou l'algorithme L-shaped.

Coupes d'optimalité

Des coupes d'optimalité représentées par (3.14) sont rajoutées séquentiellement dans l'algorithme 1. En effet, si pour une solution réalisable $(\hat{x}, \hat{\varphi})$ du programme principal on a $\hat{\varphi} \geq \mathcal{Q}^D(\hat{x})$, alors $(\hat{x}, \hat{\varphi})$ est une solution optimale, sinon une contrainte de type (3.14) coupant $(\hat{x}, \hat{\varphi})$ est introduite.

Soit la formulation duale du sous-programme suivante :

$$\max \{ (\bar{h}_\ell - T(\xi_\ell)x)^\top \omega \mid W^\top \cdot \omega \leq q, \omega \in \mathbb{R}^{|J|} \} \quad (\mathbf{D})$$

et soit $(\hat{x}, \hat{\varphi})$ une solution réalisable du programme principal. De la dualité en programmation linéaire, on a :

$$\mathcal{Q}^D(\hat{x}) = \sum_{\ell=1}^D p_\ell \cdot \mathcal{Q}(\hat{x}, \xi_\ell) = \sum_{\ell=1}^D p_\ell \cdot q^\top y_\ell = \sum_{\ell=1}^D p_\ell \cdot (\bar{h}_\ell - T(\xi_\ell)\hat{x})^\top \hat{\omega}_\ell$$

$\hat{\omega}_\ell$ est une solution duale du sous programme où $x = \hat{x}$ et $\xi = \xi_\ell$. Puisque la fonction objectif du programme (D) ci-dessus est à maximiser pour tout $x \in X$, on a :

$$\mathcal{Q}^D(x) = \sum_{\ell=1}^D p_\ell \cdot (\bar{h}_\ell - T(\xi_\ell)x)^\top \omega_\ell \geq \sum_{\ell=1}^D p_\ell \cdot (\bar{h}_\ell - T(\xi_\ell)\hat{x})^\top \hat{\omega}_\ell$$

en utilisant l'inégalité $\varphi \geq \mathcal{Q}^D(x)$, on a :

$$\varphi \geq \sum_{\ell=1}^D p_\ell \cdot (\bar{h}_\ell - T(\xi_\ell)\hat{x})^\top \hat{\omega}_\ell \quad (3.15)$$

L'inégalité (3.15) doit être respectée pour toute solution réalisable $(\hat{x}, \hat{\varphi})$ du programme principal. Les inégalités (3.15) sont représentées par les coupes d'optimalité (3.14) rajoutées séquentiellement au niveau de la ligne 2 de l'algorithme L-shaped. Le nombre de coupes d'optimalité est fini vu que le nombre de bases réalisables de la matrice W est fini [Kall & Wallace 1994].

3.3.3.2 Procédure d'approximation moyenne par échantillonnage (AME)

La méthode AME vise à calculer une approximation de l'espérance mathématique du coût de recours. En particulier, cette procédure permet le calcul de bornes inférieure et supérieure de la valeur optimale de la fonction objectif du programme (BMR). Ainsi, l'écart d'optimalité et des intervalles de confiance d'une solution d'approximation peuvent être obtenus.

De manière globale, la méthode AME procède comme suit : pour un échantillon aléatoire de $\tilde{\xi}$ de taille Λ , généré en utilisant EMCS ou ELH, le terme $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})]$ est approximé par

la fonction $\mathcal{Q}^\Lambda(x) = \frac{1}{\Lambda} \cdot \sum_{\ell=1}^{\Lambda} \mathcal{Q}(x, \xi_\ell)$. Par conséquent, le problème **(BMR)** est approximé par le problème **(BMR-DS)** où $p_\ell = \frac{1}{\Lambda}, \ell = 1, 2, \dots, \Lambda$. Le problème **(BMR-DS)** est résolu par l'algorithme L-shaped.

Soient $\gamma_\Lambda, x_\Lambda$ et γ^*, x^* les valeurs optimales et solutions optimales des problèmes **(BMR-DS)** et **(BMR)**, respectivement. Alors, on a :

$$\gamma^* = \min_{x \in X} \left\{ f(x) = c^\top x + \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[\mathcal{Q}(x, \tilde{\xi})] \right\}$$

et

$$\gamma_\Lambda = \min_{x \in X} \left\{ f_\Lambda(x) = c^\top x + \frac{1}{\Lambda} \cdot \sum_{\ell=1}^{\Lambda} \mathcal{Q}(x, \tilde{\xi}_\ell) \right\}$$

Notons que

$$\mathbb{E}(f_\Lambda(x)) = c^\top x + \frac{1}{\Lambda} \cdot \mathbb{E} \left(\sum_{\ell=1}^{\Lambda} \mathcal{Q}(x, \tilde{\xi}_\ell) \right) = f(x)$$

La loi forte des grands nombres implique que $\gamma_\Lambda \xrightarrow{\Lambda \rightarrow \infty} \gamma^*$ avec une probabilité 1. De plus, Kleywegt et al., dans [Kleywegt et al. 2001], ont montré que sous certaines conditions, quand Λ croît, x_Λ converge vers x^* avec une probabilité se rapprochant de 1 exponentiellement.

Pour obtenir des solutions du problème **(BMR)** de bonne qualité, la taille de l'échantillon Λ est déterminée par

$$\Lambda \geq \frac{3\sigma_{\max}^2}{\varepsilon^2} \log \left(\frac{|\mathcal{X}|}{\alpha} \right) \quad (3.16)$$

où σ_{\max}^2 représente la variance maximale d'une fonction de $\mathcal{Q}^\Lambda(x)$ [Kleywegt et al. 2001], $\varepsilon > 0$ et $\alpha \in]0, 1[$. Cette taille d'échantillon est suffisante pour obtenir une ε -solution \hat{x}_Λ du problème **(BMR)** avec une probabilité au moins égale à $(1 - \alpha)$, c.-à-d. une solution avec un écart absolu de l'optimum ε .

Même si elle s'avère très conservatrice en pratique (c.-à-d. elle requière un grand nombre d'échantillons), l'estimation (3.16) montre que la taille Λ de l'échantillon aléatoire est linéaire en nombre de tâches de désassemblage et postes de travail de la ligne :

$$|\mathcal{X}| \leq 2^{|J| \cdot (|I|+2)} \text{ et } |\mathcal{X}| \leq 2^{|J| \cdot (|I|+2)} \Rightarrow \log |\mathcal{X}| \leq (\log 2) \cdot |J| \times (|I| + 2).$$

En pratique, la procédure AME implique la génération de Ω échantillons aléatoires $(\xi_1^n, \xi_2^n, \dots, \xi_\Lambda^n), n = 1, 2, \dots, \Omega$, de taille réduite Λ . Des estimations des bornes inférieure et supérieure ainsi que l'écart de l'optimum dépendant de Ω et Λ sont calculés. Dans notre cas, les valeurs de Ω et Λ sont choisies de manière à obtenir des solutions de qualité acceptable.

Procédure AME

La méthode AME consiste en 3 étapes. Elle est détaillée ci-après par les algorithmes 2, 3 et 4. Dans l'algorithme 2, $\mathbb{E}(\gamma_\Lambda)$ est une borne inférieure de γ^* et $BI_{\Lambda\Omega}$ est un estimateur sans biais de $\mathbb{E}(\gamma_\Lambda)$. Dans l'algorithme 3, $f(x_\Lambda^n)$ est une borne supérieure de γ^* et BS_Λ est un estimateur sans biais de $f(x_\Lambda^n)$.

Le diagramme de la Figure 3.3 résume les étapes principales de la méthode AME. Tous les échantillons aléatoires sont générés en utilisant EMCS ou ELH.

- 1 Générer Ω échantillons aléatoires indépendants $(\xi_1^n, \xi_2^n, \dots, \xi_\Lambda^n), n = 1, 2, \dots, \Omega$
- 2 Résoudre le problème (**BMR-DS**) correspondant avec l'algorithme L-shaped
- 3 Pour chaque valeur de n , calculer une solution optimale x_Λ^n et sa valeur optimale γ_Λ^n
- 4 Calculer la valeur (une estimation d'une borne inférieure de γ^*) :

$$BI_{\Lambda\Omega} = \frac{1}{\Omega} \cdot \sum_{n=1}^{\Omega} \gamma_\Lambda^n$$

- 5 Soit $X^* \subseteq X$ l'ensemble des solutions optimales du problème (**BMR**). Alors :

$$\gamma_\Lambda \leq \min_{x \in X^*} f_\Lambda(x) \text{ et } \mathbb{E}(\gamma_\Lambda) \leq \mathbb{E}\left(\min_{x \in X^*} f_\Lambda(x)\right) \leq \min_{x \in X^*} \mathbb{E}(f_\Lambda(x)) = \gamma^*$$

- 6 Vu que $\mathbb{E}(BI_{\Lambda\Omega}) = \frac{1}{\Omega} \cdot \mathbb{E}\left(\sum_{n=1}^{\Omega} \gamma_\Lambda^n\right) = \mathbb{E}(\gamma_\Lambda)$, on a $BI_{\Lambda\Omega} \leq \gamma^*$:

- 7 La variance $\sigma_{BI_{\Lambda\Omega}}^2$ de $BI_{\Lambda\Omega}$ est estimée comme suit :

$$\sigma_{BI_{\Lambda\Omega}}^2 = \frac{1}{\Omega(\Omega-1)} \cdot \sum_{n=1}^{\Omega} (\gamma_\Lambda^n - BI_{\Lambda\Omega})^2$$

- 8 Par application du théorème centrale limite, on a :

$$BI_{\Lambda\Omega} \rightsquigarrow \mathcal{N}\left(\mathbb{E}(\gamma_\Lambda), \frac{\sigma_{BI}}{\sqrt{\Omega}}\right), \sigma_{BI} = \sqrt{\text{Var}(\gamma_\Lambda)}$$

- 9 Un intervalle de confiance de niveau $(1 - \alpha)$ de $\mathbb{E}(\gamma_\Lambda)$ est alors donné par :

$$\left[BI_{\Lambda\Omega} - \frac{z_{\alpha/2} \cdot \sigma_{BI_{\Lambda\Omega}}}{\sqrt{\Omega}}, BI_{\Lambda\Omega} + \frac{z_{\alpha/2} \cdot \sigma_{BI_{\Lambda\Omega}}}{\sqrt{\Omega}} \right], P\left(\mathcal{N}(0, 1) \leq z_\alpha\right) = 1 - \alpha$$

Algorithme 2: Procédure de calcul d'une borne supérieure du profit de la ligne de désassemblage.

- 1 Générer un échantillon aléatoire $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_\lambda)$ indépendant de ceux générés
- 2 dans l'algorithme 2, ligne 1
- 3 Soit x_λ^n une solution faisable obtenue dans l'algorithme 2, ligne 3 : x_λ^n doit être
- 4 une solution pour laquelle la valeur de $f_\lambda(x)$ est minimum
- 5 Vu que x_λ^n est réalisable pour (BMR), alors $f(x_\lambda^n) \geq \gamma^*$
- 6 Calculer la valeur (une estimation d'une borne supérieure de γ^*) :

$$BS_\lambda = f_\lambda(x_\lambda^n)$$

- 7 BS_λ est un estimateur sans biais de $f(x_\lambda^n)$:

$$\mathbb{E}(f_\lambda(x_\lambda^n)) = f(x_\lambda^n), \text{ on a alors } BS_\lambda \geq \gamma^*$$

- 8 La variance $\sigma_{BS_\lambda}^2$ de BS_λ peut être estimée par :

$$\sigma_{BS_\lambda}^2 = \frac{1}{\lambda(\lambda-1)} \cdot \sum_{\ell=1}^{\lambda} (c^\top x_\lambda^n + \mathcal{Q}(x_\lambda^n, \xi_\ell) - BS_\lambda)^2$$

- 9 Par application du théorème centrale limite, on a :

$$BS_\lambda \rightsquigarrow \mathcal{N}\left(f(x_\lambda^n), \frac{\sigma_{BS}}{\sqrt{\lambda}}\right), \sigma_{BS} = \sqrt{\text{Var}(f_\lambda(x_\lambda^n))}$$

- 10 Un intervalle de confiance de niveau $(1 - \alpha)$ de $f(x_\lambda^n)$ est alors donné par :

$$\left[BS_\lambda - \frac{z_{\alpha/2} \cdot \sigma_{BS_\lambda}}{\sqrt{\lambda}}, BS_\lambda + \frac{z_{\alpha/2} \cdot \sigma_{BS_\lambda}}{\sqrt{\lambda}} \right], P\left(\mathcal{N}(0, 1) \leq z_\alpha\right) = 1 - \alpha$$

Algorithme 3: Procédure de calcul d'une borne inférieure du profit de la ligne de désassemblage.

1 L'écart d'optimalité $EO_{\lambda\Omega\Lambda}$ est calculé comme suit :

$$EO_{\lambda\Omega\Lambda} = BS_{\lambda} - BI_{\Omega\Lambda}$$

2 Notons que :

$$\mathbb{E}(EO_{\lambda\Omega\Lambda}) = f(x_{\lambda}^n) - \mathbb{E}(\gamma_{\Lambda}) \geq f(x_{\lambda}^n) - \gamma^*$$

3 Il en découle que $EO_{\lambda\Omega\Lambda}$ est un estimateur biaisé de l'écart d'optimalité, il surestime

$$f(x_{\lambda}^n) - \gamma^*$$

4 Son biais $(\gamma^* - \mathbb{E}(\gamma_{\Lambda}))$ est décroissant monotone en Λ

5 La variance $\sigma_{EO_{\lambda\Omega\Lambda}}^2$ de $EO_{\lambda\Omega\Lambda}$ est estimée par :

$$\sigma_{EO_{\lambda\Omega\Lambda}}^2 = \sigma_{BI_{\Omega\Lambda}}^2 + \sigma_{BS_{\lambda}}^2$$

Algorithme 4: Procédure de calcul de l'écart d'optimalité des bornes inférieure et supérieure du profit de la ligne de désassemblage.

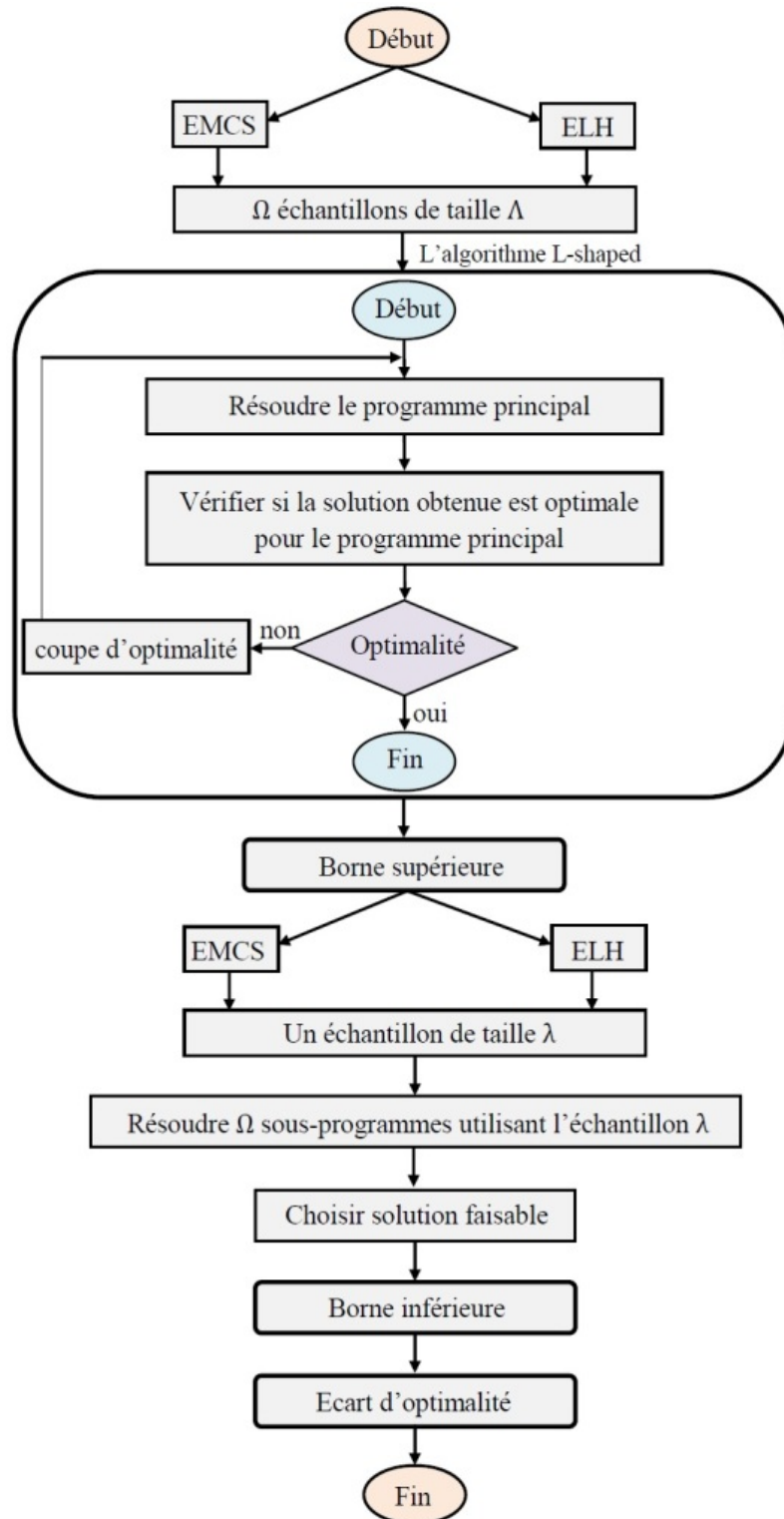


FIGURE 3.3 – Diagramme de la méthode d'approximation moyenne par échantillonnage du profit de la ligne de désassemblage.

3.3.4 Résolution de la phase 2

Soit $S_l(\tilde{\xi}) = |\mathbf{S}_l(\tilde{\xi})|$ et soit la variable aléatoire $S_l^\lambda(\tilde{\xi}) = \frac{1}{\lambda} \sum_{\ell=1}^{\lambda} S_l(\tilde{\xi}_\ell)$, $l \in \mathcal{B}$. Alors, $S_l^\lambda(\tilde{\xi}), l \in \mathcal{B}$ représente un estimateur sans biais de $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(S_l(\tilde{\xi})), l \in \mathcal{B}$:

$$\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[S_l^\lambda(\tilde{\xi})] = \mathbb{E}\left(\frac{1}{\lambda} \sum_{\ell=1}^{\lambda} S_l(\tilde{\xi}_\ell)\right) = \frac{1}{\lambda} \sum_{\ell=1}^{\lambda} \mathbb{E}(S_l(\tilde{\xi}_\ell)) = \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}[S_l(\tilde{\xi})]$$

Soit $z_{\ell} \geq S_l(\xi_\ell) = |\mathbf{S}_l(\xi_\ell)|, \ell = 1, 2, \dots, \lambda, \forall l \in \mathcal{B}$. En utilisant un λ -échantillon $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_\lambda)$ du vecteur aléatoire $\tilde{\xi}$, la valeur optimale du programme linéaire (**AMEMC**) ci-dessous est une approximation de la valeur optimale du programme **MEMC**.

min Y (**AMEMC**)

s.c.

$$\sum_{j \in J^*} x_{ij} = 1, \forall i \in I^*$$

$$\sum_{j \in J^*} j \cdot x_{ij} \leq \sum_{j \in J^*} j \cdot x_{ij}, \forall i \in I^*, \forall i' \in \text{Pred}(i)$$

$$Y \geq \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{\ell=1}^{\ell=\lambda} z_{\ell}, \forall l \in \mathcal{B}$$

$$u_{\ell} + \mathbf{S}_l(\xi_\ell) = z_{\ell}, \forall l \in \mathcal{B}, \ell = 1, 2, \dots, \lambda$$

$$0 \leq u_{\ell} \leq 2z_{\ell}, \forall l \in \mathcal{B}, \ell = 1, 2, \dots, \lambda$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I^*, \forall j \in J^*$$

$$z_{\ell} \geq 0, \ell = 1, 2, \dots, \lambda, \forall l \in \mathcal{B}$$

$$Y \geq 0$$

Proposition. La valeur optimale du programme (**AMEMC**) est une borne supérieure de la valeur optimale du programme (**MEMC**).

Démonstration. Puisque $z_{\ell} \geq S_l(\xi_\ell), \ell = 1, 2, \dots, \lambda, \forall l \in \mathcal{B}$, alors :

$$\sum_{\ell=1}^{\ell=\lambda} z_{\ell} \geq \sum_{\ell=1}^{\ell=\lambda} S_l(\xi_\ell), \forall l \in \mathcal{B}$$

et

$$Y \geq \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{\ell=1}^{\ell=\lambda} z_{\ell} \geq \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{\ell=1}^{\ell=\lambda} S_l(\xi_\ell), \forall l \in \mathcal{B}$$

□

3.4 Expérimentations et résultats d'optimisation

La procédure AME de la phase 1 et le programme (**AMEMC**) de la phase 2 ont été implémentés sous MS Visual C++. Le solveur ILOG CPLEX 12.4 a été utilisé pour résoudre les différents modèles sur une machine Pentium(R) Dual-Core CPU T4500, 2.30 GHz et 3GB RAM.

Ces deux phases séquentielles ont été appliquées à 7 instances de la littérature qui contiennent des alternatives de désassemblage de produits en fin de vie. Le nom d'une instance est composé des premières lettres des auteurs et l'année de publication. Les données relatives à ces instances sont rapportées dans le Tableau 3.1. La colonne 'relations ET' représente le nombre de tâches de désassemblage : '0' sans successeur, '1' avec un seul arc de type ET et '2' avec deux arcs ET. La colonne 'arcs' représente le nombre total d'arcs de type ET et OU.

Le Tableau 3.2 regroupe les résultats d'optimisation de la phase de maximisation du profit de la ligne (phase 1) obtenus en utilisant l'échantillonnage latin hypercube (ELH), et le Tableau 3.3 ceux obtenus en utilisant l'échantillonnage Monte Carlo simple (EMCS). Différentes valeurs de Λ et λ ont été considérées. Le nombre d'échantillons Ω générés était de 10, le coût de recours q était fixé à 5, le coût opérationnel F_c à 3, le coût de traitement des matières polluantes ou dangereuses C_h à 2, le niveau des intervalles de confiance $(1 - \alpha)$ à 95% et 25% des tâches ont été prises comme dangereuses. Les paramètres restants ont été générés aléatoirement. Même si les distributions de probabilités des durées opératoires peuvent être différentes d'une tâche à une autre et pouvant avoir des lois quelconques connues, les durées opératoires des tâches ont été supposées suivre des lois normales connues. Les colonnes ' BI ' et ' BS ' contiennent les valeurs des estimations des bornes inférieures et supérieures, respectivement, avec les intervalles de confiance correspondants. La colonne ' EO ' contient les valeurs des écarts d'optimalité $EO_{\lambda\Omega\Lambda}$ et les valeurs des écarts

TABLE 3.1 – Instances de désassemblage de la littérature.

		$ I $	$ K $	$ L $	arcs	relations ET			$ J $	C_t
						0	1	2		
MJKL11	[Ma <i>et al.</i> 2011]	37	22	33	76	4	27	6	10	35
BBD13a	[Bentaha <i>et al.</i> 2013a]	32	14	23	60	4	28	0	4	0.80
L99a	[Lambert 1999]	30	18	28	60	2	26	2	9	30
BBD13b	[Bentaha <i>et al.</i> 2013a]	25	11	27	49	4	18	3	4	91
KSE09	[Koc <i>et al.</i> 2009]	23	13	20	47	4	14	5	6	20
L99b	[Lambert 1999]	20	13	23	41	5	9	6	9	5.5
BBD13	[Bentaha <i>et al.</i> 2013b]	10	5	12	18	3	6	1	3	0.51

types $\sigma_{EO_{\lambda\Omega\Lambda}}$ associées. Enfin, les colonnes ‘tâches-o.’, ‘tâches-s.’, ‘ n_{postes} ’, ‘postes-d.’ et ‘temps(s)’ rapportent, respectivement, le nombre total de tâches de l’alternative de désassemblage choisie, le nombre de tâches finalement sélectionnées, le nombre de postes de travail, le nombre de postes traitant des matières dangereuses avec leur position dans la ligne de désassemblage et le temps de résolution en secondes.

Ces Résultats montrent que la procédure d’approximation moyenne par échantillonnage utilisant EMCS retourne des valeurs des bornes inférieures BI et supérieures BS plus intéressantes que celles en utilisant ELH. En effet, ces valeurs sont plus élevées et le problème résolu s’agit d’une maximisation. Pour cette raison, nous limitons la discussion des résultats au Tableau 3.3. Ce dernier montre que la qualité d’une solution est proportionnelle à la valeur de Λ . La Figure 3.4 illustre la convergence des valeurs estimées des solutions obtenues vers les valeurs optimales : les écarts types $\sigma_{EO_{\lambda\Omega\Lambda}}$ sont significativement réduits avec l’augmentation des valeurs de Λ . Cependant, le temps de résolution illustré par la Figure 3.5 croît de manière considérable avec l’accroissement des valeurs de Λ .

Notons que pour retourner une solution d’approximation pour une instance donnée, la procédure AME résout un grand nombre de programmes linéaires continus et en nombres entiers. Par exemple, si $\Omega = 10$, $\Lambda = 500$ et $\lambda = 700$ alors, au moins un nombre total de $\Omega \times \Lambda + \Omega \times \lambda = 12000$ programmes entiers et continus sont résolus : $\Omega \times \Lambda$ programmes dans l’algorithme 2 de la procédure AME et $\Omega \times \lambda$ dans l’algorithme 3. Pour avoir une solution dans le cas des durées opératoires déterministes, un seul programme linéaire en nombres entiers est résolu.

Le Tableau 3.4 rapporte les résultats d’optimisation de la phase 2 de l’équilibrage des charges en utilisant l’échantillonnage Monte Carlo simple pour différentes valeurs de λ . Les autres paramètres ont été les mêmes que précédemment. La colonne ‘Objectif’ indique la valeur optimale de la fonction objectif du problème (**AMEMC**) et la colonne ‘Réaffectation’ indique la valeur 0 si la solution de la phase 2 est identique à celle de la phase 1 et la valeur 1 sinon. Les résultats du Tableau 3.4 montrent qu’à l’exception de l’instance L99b, la solution de la phase 1 reste inchangée en phase 2. Le temps de résolution est réduit grâce à l’élimination des contraintes du temps de cycle. Ces dernières ne sont pas requises dans la phase 2 puisque le nombre de postes de travail a été déjà fixé et une affectation des tâches à ces postes a été déjà trouvée. Les alternatives de désassemblage et les tâches sélectionnées pour l’instance L99b à la phase 1 et à la phase 2 sont illustrées par la Figure 3.6.

Le Tableau 3.5 établit une comparaison, pour différentes valeurs de λ , entre la solution x de la phase 1 et la solution x' de la phase 2 en termes de coût de recours, et donc de profit de la ligne. Les colonnes ‘Coût de recours estimé’ rapporte le coût de recours des postes 1, 2 et 3 dans les sous-colonnes ‘ R_{W1} ’, ‘ R_{W2} ’ et ‘ R_{W3} ’, respectivement ; ‘ R_{total} ’ représente le coût de recours de la ligne. La variable η et le paramètre ϱ introduits dans la sous-section

3.2.2 indiquent respectivement le pourcentage d'augmentation du coût de recours dans la phase 2 et le pourcentage accepté d'augmentation du coût de recours fixé par le décideur.

La comparaison entre x et x' est schématisée par la Figure 3.7 dont l'objectif est de montrer l'importance de la phase 2. Comme montré par le Tableau 3.5, la solution x' de la phase 2 est clairement meilleure que la solution x de la phase 1. En effet, les 3 postes de travail sont mieux équilibrés avec x' qu'avec x et le coût de recours dans la phase 2 a diminué de 85% comparé à celui dans la phase 1. En d'autres termes, le coût de recours dans la phase 2 représente seulement 15% de celui dans la phase 1. Par conséquent, $\eta \ll \varrho$ et x' est retenue comme solution finale. Le temps de résolution croît de manière faible comparé à l'accroissement des valeurs de λ dû à la nature continue des programmes linéaires résolus pour chaque valeur de λ . En effet, si $\lambda = 100$ alors, 100 programmes linéaires continus, comme ceux du deuxième stage de l'algorithme L-shaped, sont résolus.

Comme le temps de résolution croît de manière significative en nombres de tâches, d'alternatives de désassemblage, d'arcs de type ET, etc., et les valeurs de Ω , Λ et λ , pour utiliser l'approche proposée, il est possible de résoudre les Ω programmes principaux en parallèle. Ce-ci permettra de diviser le temps de résolution à peu près par Ω . Pour chaque programme principal, les Λ sous-problèmes correspondants peuvent être résolus en parallèle également, ce qui divise le temps de résolution à peu près par Λ . De plus, les λ sous-problèmes peuvent être résolus en parallèle divisant ainsi le temps de résolution correspondant de nouveau à peu près par λ . La méthode proposée peut être appliquée pour n'importe quelles distributions de probabilité connues des durées opératoires des tâches même différentes d'une tâche à l'autre. En plus, cette procédure peut prendre en compte d'autres sources d'incertitudes comme celles du temps de cycle par exemple : il suffit de remplacer les valeurs C_t par les réalisations associées. Les valeurs BI , BS et EO permettent d'évaluer la qualité des solutions obtenues. Enfin, la procédure proposée peut être facilement adaptée au problème de conception des lignes d'assemblage comme le montre la section suivante.

TABLE 3.2 – Maximisation du profit de la ligne : résultats d'optimisation avec échantillonnage latin hypercube.

	Λ, λ	BI	BS	EO	tâches-o.	tâches-s.	n postes	postes-d.	temps(s)
MJKL11	100, 200	27.947 ± 0.159	27.473 ± 0.412	$-0.474, 2.982$	7	5	2	(1 : 1)	139
	300, 600	27.740 ± 0.102	27.375 ± 0.136	$-0.365, 1.705$	7	5	2	(1 : 1)	886
	600, 900	27.762 ± 0.071	27.546 ± 0.091	$-0.216, 1.394$	7	5	2	(1 : 1)	3074
	800, 1200	27.694 ± 0.063	27.896 ± 0.068	$0.202, 1.201$	7	5	2	(1 : 1)	5449
	1000, 1500	27.628 ± 0.067	28.149 ± 0.054	$0.521, 1.072$	7	5	2	(1 : 1)	8445
BBD13a	100, 200	180.240 ± 0.006	180.277 ± 1.778	$0.037, 12.831$	4	2	1	(1 : 1)	61
	300, 600	180.257 ± 0.002	180.259 ± 0.592	$0.002, 7.395$	4	2	1	(1 : 1)	382
	600, 900	180.252 ± 0.003	180.256 ± 0.394	$0.004, 6.037$	4	2	1	(1 : 1)	1166
	800, 1200	180.262 ± 0.002	180.264 ± 0.296	$0.002, 5.227$	4	2	1	(1 : 1)	2055
	1000, 1500	180.257 ± 0.001	180.258 ± 0.237	$0.001, 4.675$	4	2	1	(1 : 1)	3140
L99a	100, 200	484.342 ± 0.215	484.460 ± 5.199	$0.118, 37.511$	9	7	3	-	166
	300, 600	484.307 ± 0.176	483.962 ± 1.729	$-0.345, 21.614$	9	7	3	-	1133
	600, 900	484.092 ± 0.106	484.191 ± 1.153	$0.099, 17.646$	9	7	3	-	3747
	800, 1200	484.184 ± 0.076	484.657 ± 0.864	$0.473, 15.281$	9	7	3	-	6727
	1000, 1500	484.339 ± 0.036	483.941 ± 0.692	$-0.398, 13.667$	9	7	3	-	10152
BBD13b	100, 200	162.620 ± 0.451	162.967 ± 2.904	$0.347, 20.967$	4	3	2	-	78
	300, 600	161.751 ± 0.245	163.558 ± 0.959	$1.807, 11.999$	4	3	2	-	494
	600, 900	161.633 ± 0.204	162.727 ± 0.645	$1.094, 9.878$	4	3	2	-	1655
	800, 1200	161.458 ± 0.152	163.109 ± 0.481	$1.651, 8.500$	4	3	2	-	2810
	1000, 1500	162.167 ± 0.154	161.67 ± 0.385	$-0.497, 7.621$	4	3	2	-	4375
KSE09	100, 200	891.565 ± 0.116	891.534 ± 8.843	$-0.031, 63.806$	6	4	2	(1 : 2)	78
	300, 600	891.428 ± 0.049	891.460 ± 2.943	$0.032, 36.777$	6	4	2	(1 : 2)	491
	600, 900	891.464 ± 0.030	891.532 ± 1.961	$0.068, 30.020$	6	4	2	(1 : 2)	1444
	800, 1200	891.487 ± 0.040	891.531 ± 1.471	$0.044, 25.994$	6	4	2	(1 : 2)	2754
	1000, 1500	891.385 ± 0.034	891.697 ± 1.176	$0.312, 23.248$	6	4	2	(1 : 2)	3814
L99b	100, 200	74.302 ± 0.025	74.262 ± 0.742	$-0.040, 5.354$	8	6	3	-	292
	300, 600	74.175 ± 0.010	74.265 ± 0.247	$0.090, 3.086$	8	6	3	-	2282
	600, 900	74.210 ± 0.008	74.171 ± 0.165	$-0.039, 2.519$	8	6	3	-	7951
	800, 1200	74.188 ± 0.006	74.205 ± 0.123	$0.017, 2.181$	8	6	3	-	13637
	1000, 1500	74.188 ± 0.004	74.139 ± 0.099	$-0.049, 1.951$	8	6	3	-	22211
BBD13	100, 200	92.851 ± 0.002	92.857 ± 0.923	$0.006, 6.658$	3	3	2	(1 : 2)	54
	300, 600	92.849 ± 0.001	92.849 ± 0.307	$0.000, 3.838$	3	3	2	(1 : 2)	311
	600, 900	92.849 ± 0.001	92.851 ± 0.205	$0.002, 3.133$	3	3	2	(1 : 2)	927
	800, 1200	92.847 ± 0.001	92.847 ± 0.153	$0.000, 2.712$	3	3	2	(1 : 2)	1598
	1000, 1500	92.846 ± 0.000	92.851 ± 0.123	$0.005, 2.426$	3	3	2	(1 : 2)	2437

TABLE 3.3 – Maximisation du profit de la ligne : résultats d’optimisation avec échantillonnage Monte Carlo simple.

	Λ, λ	BI	BS	EO	<i>tâches-o.</i>	<i>tâches-s.</i>	<i>n_{postes}</i>	<i>postes-d.</i>	<i>temps(s)</i>
MJKL11	100, 200	34.214 ± 0.192	34.032 ± 0.384	$-0.182, 2.785$	7	5	2	(1 : 1)	101
	300, 600	33.753 ± 0.088	33.865 ± 0.127	$0.112, 1.591$	7	5	2	(1 : 1)	738
	600, 900	33.942 ± 0.096	33.826 ± 0.085	$-0.116, 1.307$	7	5	2	(1 : 1)	2836
	800, 1200	33.921 ± 0.093	33.782 ± 0.064	$-0.139, 1.139$	7	5	2	(1 : 1)	4506
	1000, 1500	34.027 ± 0.034	34.063 ± 0.051	$0.036, 1.006$	7	5	2	(1 : 1)	7122
BBD13a	100, 200	180.400 ± 0.010	180.420 ± 1.778	$0.020, 12.831$	4	2	1	(1 : 1)	44
	300, 600	180.425 ± 0.008	180.446 ± 0.592	$0.021, 7.396$	4	2	1	(1 : 1)	333
	600, 900	180.428 ± 0.003	180.424 ± 0.394	$-0.004, 6.037$	4	2	1	(1 : 1)	1103
	800, 1200	180.434 ± 0.003	180.423 ± 0.296	$-0.011, 5.227$	4	2	1	(1 : 1)	1973
	1000, 1500	180.425 ± 0.002	180.439 ± 0.236	$0.014, 4.675$	4	2	1	(1 : 1)	3057
L99a	100, 200	499.168 ± 0.402	499.614 ± 5.191	$0.446, 37.461$	9	7	3	-	133
	300, 600	499.628 ± 0.184	501.170 ± 1.727	$1.542, 21.591$	9	7	3	-	1104
	600, 900	500.096 ± 0.148	500.376 ± 1.151	$0.280, 17.624$	9	7	3	-	3852
	800, 1200	500.176 ± 0.146	499.462 ± 0.863	$-0.714, 15.262$	9	7	3	-	7791
	1000, 1500	500.136 ± 0.141	500.403 ± 0.691	$0.267, 13.649$	9	7	3	-	11309
BBD13b	100, 200	208.532 ± 1.056	209.080 ± 2.779	$0.548, 20.125$	4	3	2	-	65
	300, 600	204.841 ± 0.694	206.941 ± 0.924	$2.100, 11.599$	4	3	2	-	549
	600, 900	207.779 ± 0.476	205.562 ± 0.618	$-2.217, 9.491$	4	3	2	-	1863
	800, 1200	207.859 ± 0.463	204.477 ± 0.462	$-3.382, 8.209$	4	3	2	-	3069
	1000, 1500	207.089 ± 0.268	207.443 ± 0.369	$0.354, 7.317$	4	3	2	-	4826
KSE09	100, 200	896.117 ± 0.142	895.766 ± 8.842	$-0.351, 63.802$	6	4	2	(1 : 2)	53
	300, 600	895.988 ± 0.068	895.582 ± 2.942	$-0.406, 36.774$	6	4	2	(1 : 2)	457
	600, 900	895.692 ± 0.053	895.901 ± 1.961	$0.209, 30.018$	6	4	2	(1 : 2)	1393
	800, 1200	895.806 ± 0.050	895.910 ± 1.471	$0.104, 25.992$	6	4	2	(1 : 2)	2415
	1000, 1500	895.680 ± 0.053	895.823 ± 1.176	$0.143, 23.246$	6	4	2	(1 : 2)	3845
L99b	100, 200	75.261 ± 0.006	75.055 ± 0.742	$-0.206, 5.353$	8	6	3	-	235
	300, 600	75.204 ± 0.008	75.197 ± 0.247	$-0.007, 3.085$	8	6	3	-	2422
	600, 900	75.206 ± 0.003	75.246 ± 0.165	$0.040, 2.518$	8	6	3	-	8731
	800, 1200	75.232 ± 0.005	75.225 ± 0.123	$-0.007, 2.180$	8	6	3	-	14913
	1000, 1500	75.216 ± 0.007	75.223 ± 0.099	$0.007, 1.950$	8	6	3	-	24439
BBD13	100, 200	92.917 ± 0.006	92.895 ± 0.923	$-0.022, 6.658$	3	3	2	(1 : 2)	40
	300, 600	92.914 ± 0.004	92.894 ± 0.307	$-0.020, 3.837$	3	3	2	(1 : 2)	328
	600, 900	92.910 ± 0.004	92.916 ± 0.205	$0.006, 3.132$	3	3	2	(1 : 2)	1103
	800, 1200	92.913 ± 0.003	92.906 ± 0.153	$-0.007, 2.712$	3	3	2	(1 : 2)	1981
	1000, 1500	92.912 ± 0.002	92.932 ± 0.123	$0.020, 2.426$	3	3	2	(1 : 2)	3205

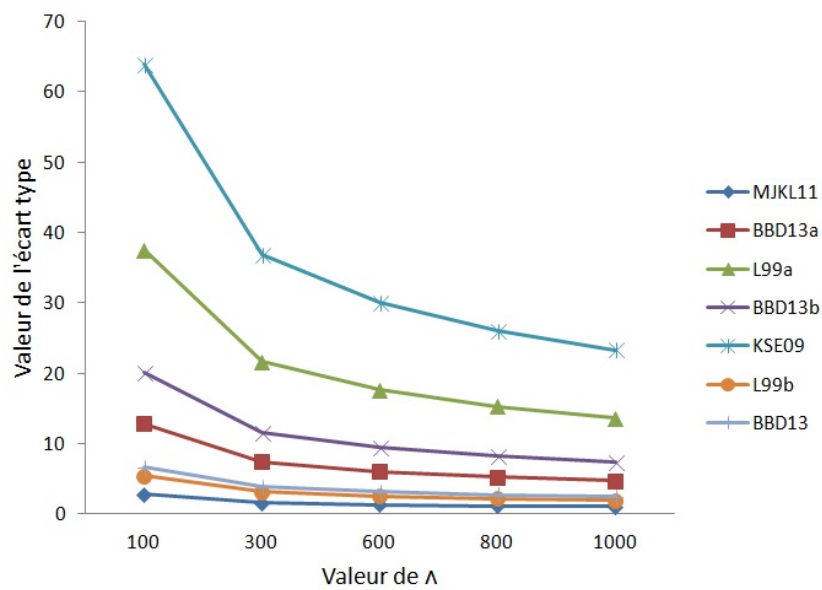


FIGURE 3.4 – Écart d'optimalité en phase 1, maximisation du profit de la ligne, avec l'échantillonnage Monte Carlo simple.

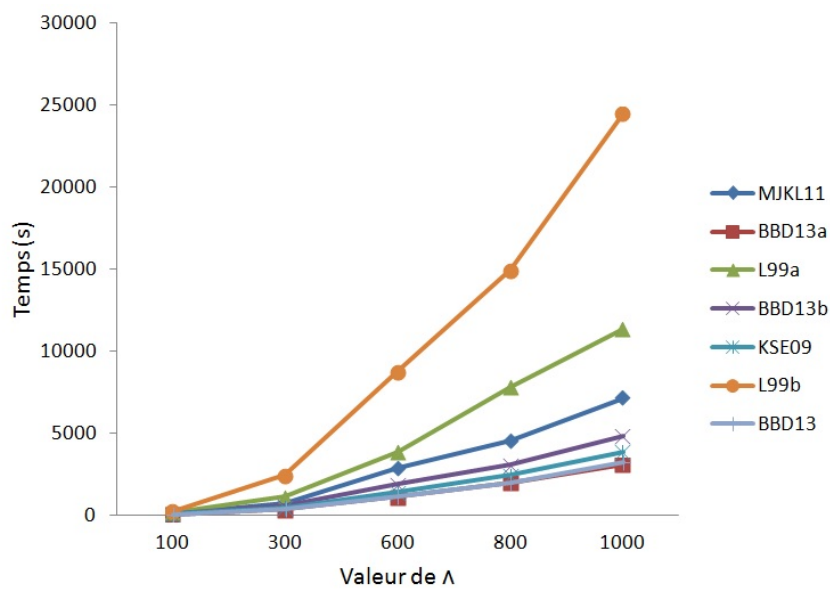


FIGURE 3.5 – Temps de résolution en secondes de la phase 1 avec l'échantillonnage Monte Carlo simple.

TABLE 3.4 – Résultats d’optimisation de la phase d’équilibrage des charges.

	λ	Objectif	Ré-affectation	temps(s)
MJKL11	500	16.03	0	0.016
	1000	16.18	0	0.047
	1500	15.82	0	0.031
BBD13a	500	0	0	0.000
	1000	0	0	0.000
	1500	0	0	0.000
L99a	500	7.679	0	26.22
	1000	7.523	0	90.57
	1500	7.644	0	269.19
BBD13b	500	22.95	0	0.078
	1000	23.00	0	0.172
	1500	23.72	0	0.296
KSE09	500	6.533	0	0.016
	1000	6.539	0	0.062
	1500	6.526	0	0.034
L99b	500	1.904	1	44.73
	1000	1.791	1	198.64
	1500	1.827	1	543.09
BBD12	500	0.498	0	0.030
	1000	0.499	0	0.020
	1500	0.499	0	0.030

TABLE 3.5 – Le coût de recours de l’instance L99b.

	λ	Coût de recours estimé				$\eta(\%)$	$\varrho(\%)$	temps(s)
		R_{W1}	R_{W2}	R_{W3}	R_{total}			
x	5000	0	0.00006	0.25006	0.25012	−85.75	5	24
	7500	0	0.00008	0.23578	0.23586			54
	10000	0	0.00005	0.24539	0.24544	−85.07	5	94
	12500	0	0.00010	0.24623	0.24633			144
	15000	0	0.00007	0.24874	0.24881	−85.80	5	204
x'	5000	0.00948	0	0.02617	0.03565			25
	7500	0.00809	0	0.02712	0.03521	−85.24	5	53
	10000	0.00883	0	0.02601	0.03484			94
	12500	0.00873	0	0.02763	0.03636	−85.64	5	145
	15000	0.00847	0	0.02727	0.03574			204

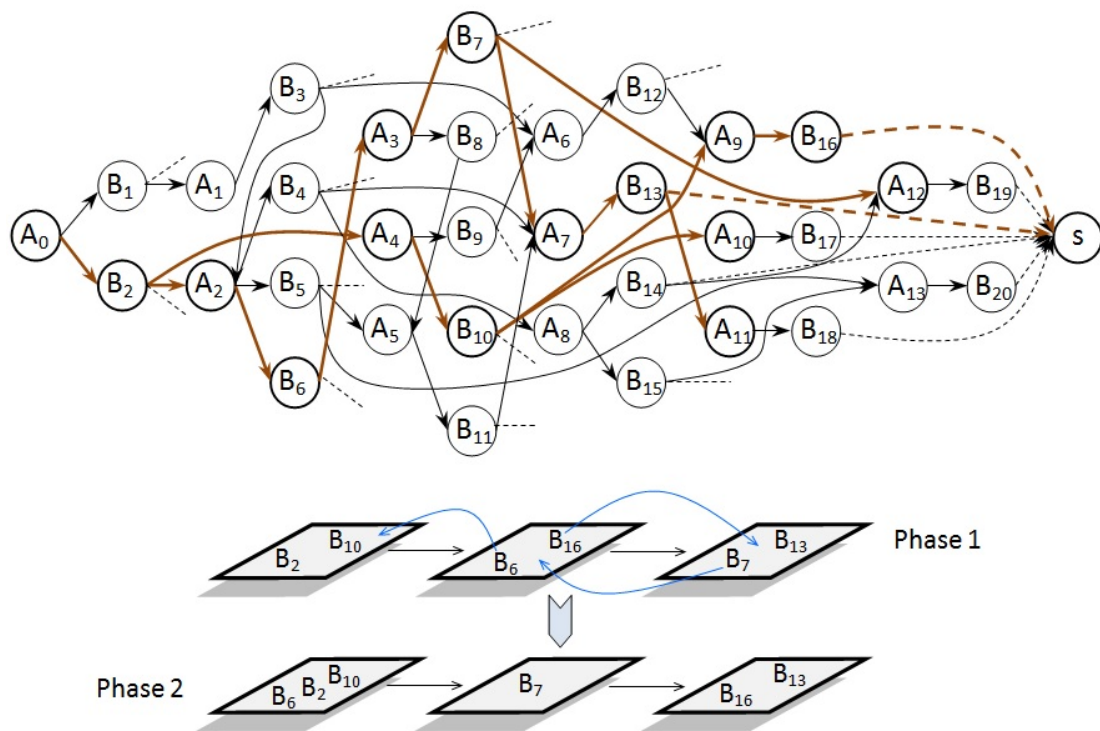


FIGURE 3.6 – La solution choisie pour l'instance L99b : l'alternative de désassemblage et les tâches correspondantes pour chaque phase d'optimisation.

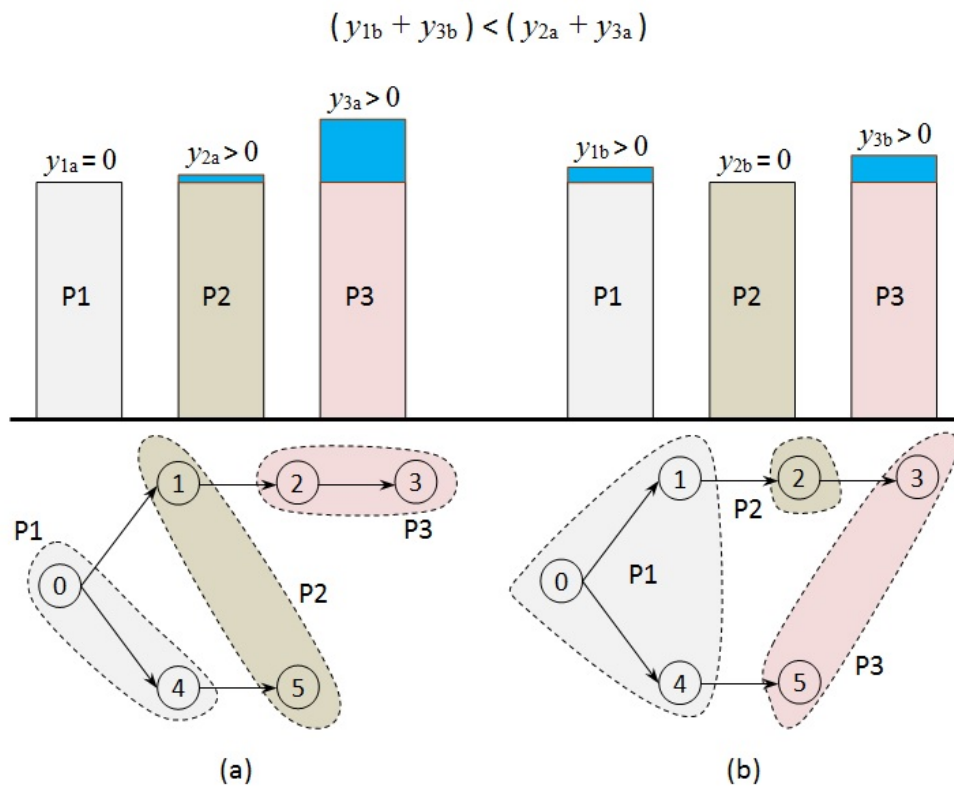


FIGURE 3.7 – Équilibrage des charges et réduction du coût de recours de l'instance L99b : (a) phase 1, maximisation du profit de la ligne et affectation des tâches ; (b) phase 2, équilibrage des charges et ré-affectation des tâches.

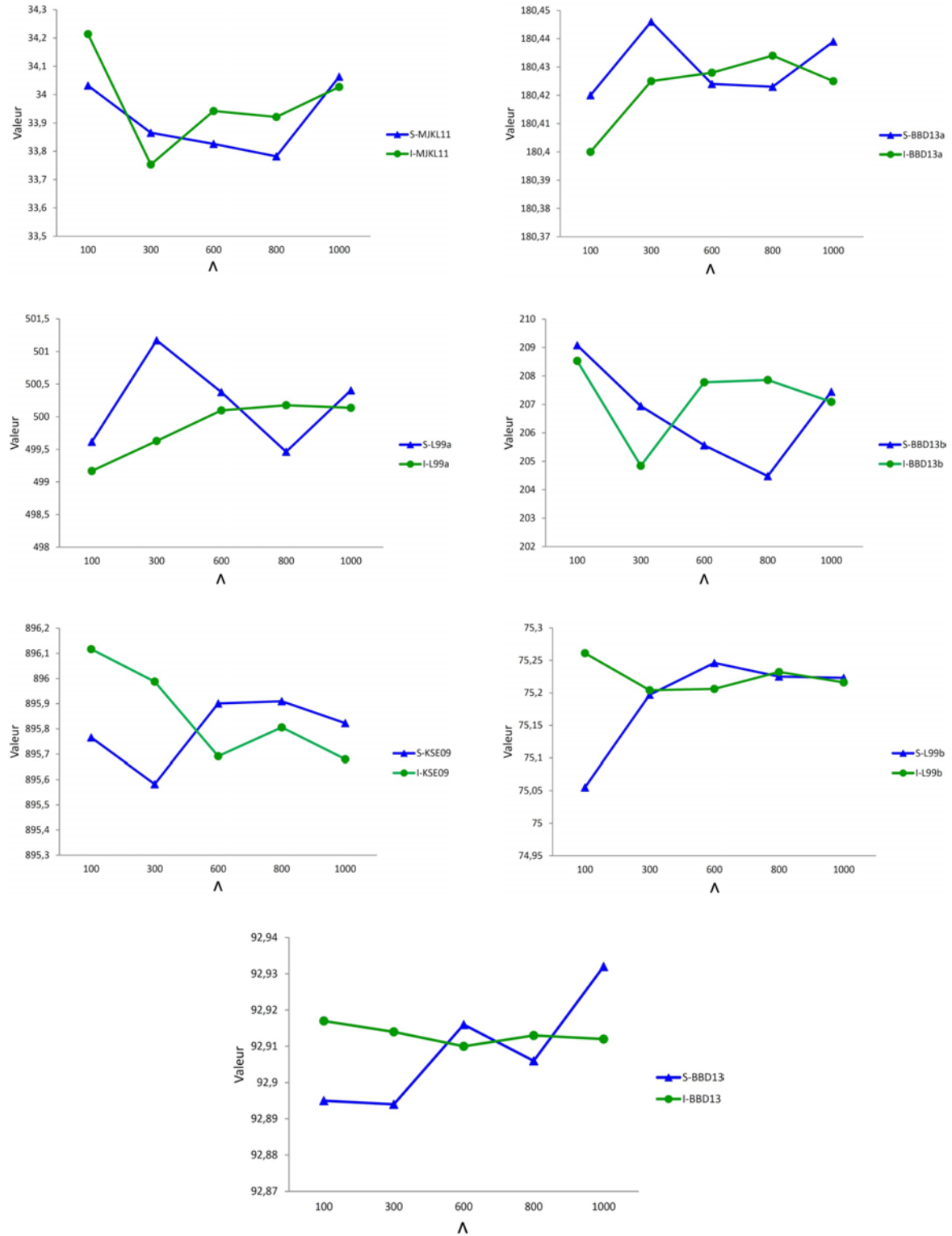


FIGURE 3.8 – Convergence des valeurs des bornes inférieures BI et supérieures BS des instances étudiées.

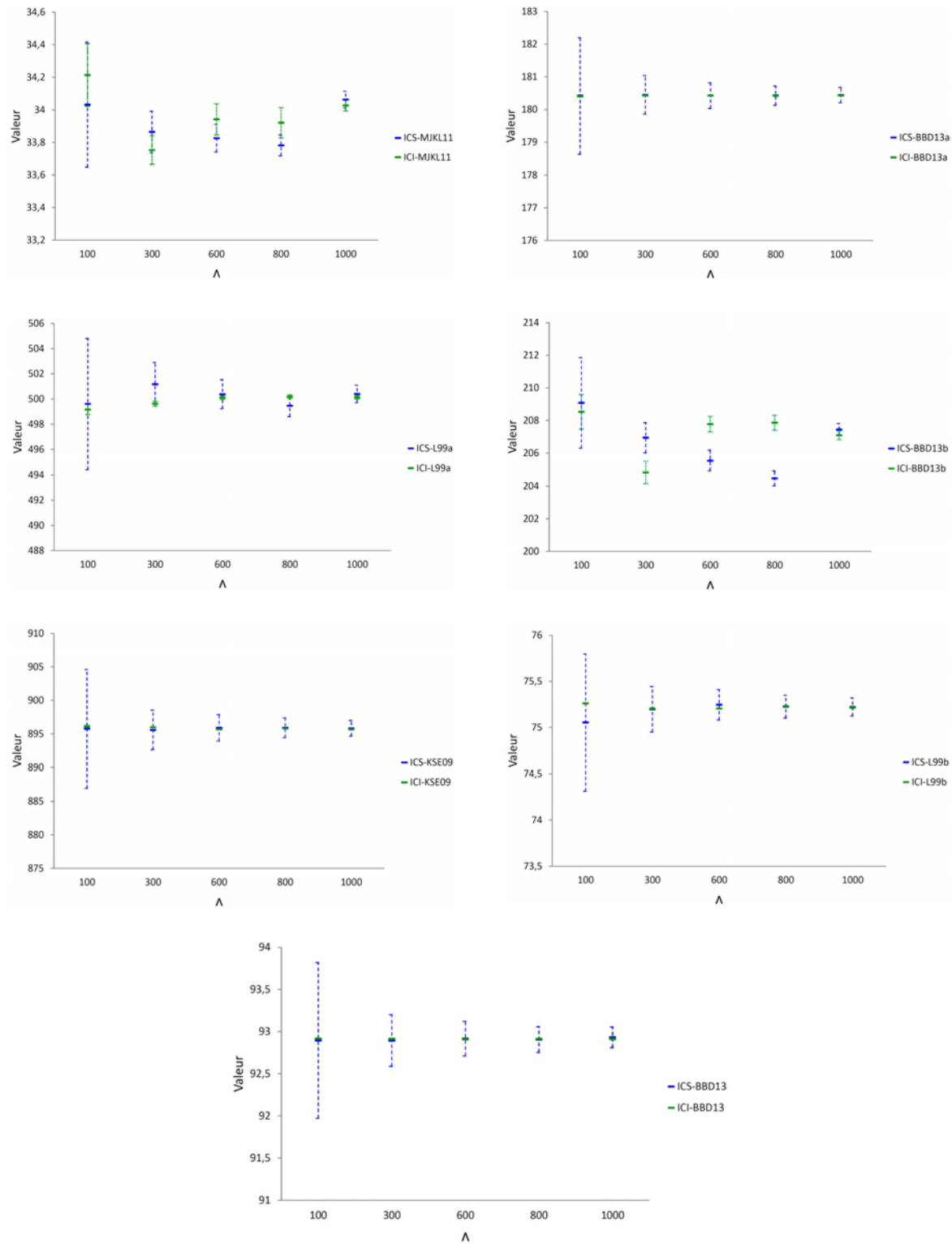


FIGURE 3.9 – Intervalles de confiance de niveau 95% des valeurs des bornes inférieures BI et supérieures BS des instances étudiées.

Résultats d'optimisation pour le problème SALBP-1 sous incertitudes avec coût de recours fixe

Afin de montrer la validité de l'approche de résolution développée pour le cas d'assemblage, le problème SALBP-1 sous incertitudes avec recours fixe est résolu. Deux phases ont été également considérées, celle de conception par la minimisation du nombre de postes de travail et celle d'équilibrage des charges de ces derniers. Les 16 instances utilisées sont disponibles sur le site internet <http://alb.mansci.de>. Les données relatives à chaque instance sont regroupées dans le Tableau 4.6. Les colonnes ' $|I|$ ', ' $|\underline{J}|$ ' est ' C_t ' représente, respectivement, le nombre de tâches d'assemblage, une borne inférieure du nombre de postes de travail et le temps de cycle.

TABLE 3.6 – Instances considérées du problème SALBP-1 avec coût de recours fixe.

	$ I $	$ \underline{J} $	C_t		$ I $	$ \underline{J} $	C_t
1. Mertens	7	2	18	9. Buxey	29	6	54
2. Bowman	8	4	20	10. Sawyer	30	5	75
3. Jaeschke	9	3	18	11. Lutz1	32	5	2828
4. Jackson	11	3	21	12. Gunther	35	6	81
5. Mansoor	11	2	94	13. Kilbridge	45	3	184
6. Mitchell	21	3	39	14. Hahn	53	3	4676
7. Roszieg	25	4	32	15. Tonge	70	7	527
8. Heskiaoff	28	3	342	-	-	-	-

Les tests ont été réalisés sur la même machine sous contrainte d'une heure de résolution. Les durées opératoires des tâches de toutes les instances ont été prises pour des variables aléatoires normales mutuellement indépendantes avec des moyennes $\mu_i, i \in I$ et écarts types $\sigma_i, i \in I$ connus. Les valeurs moyennes utilisées sont celles définies sur le site su-cité ; les valeurs des écarts types sont fixées à $\mu_i/10, i \in I$. La borne inférieure $|\underline{J}|$ du nombre de postes requis est calculée comme suit :

$$\left\lceil \frac{\sum_{i \in I} \mu_i}{C_t} \right\rceil$$

Les Tableaux 3.7 et 3.8 rapportent, respectivement, les résultats d'optimisation de la phase 1 et de la phase 2. Dans le Tableau 3.8, seulement les 8 premières instances sont considérées. La colonne 'Ré-affectation' indique la valeur 0 si la solution de la phase 2 est identique à celle de la phase 1 et la valeur 1 si cette solution est différentes sans amélioration du coût de recours, 1^+ si ce dernier est amélioré (diminué). Ces résultats confirment ceux obtenus pour le cas de désassemblage.

TABLE 3.7 – Minimisation du nombre de postes de travail : résultats d’optimisation obtenus avec l’échantillonnage Monte Carlo simple.

	Ω, Λ, λ	BI	BS	EO	n_{postes}	temps(s)
1. Mertens	3, 10, 20	180.001 ± 0.001	180.000 ± 0.588	$-0.001, 7.355$	2	40.8
2. Bowman	3, 10, 20	428.785 ± 1.885	430.905 ± 40.238	$2.120, 91.8256$	4	2.9
3. Jaeschke	3, 10, 20	270.005 ± 0.005	270.000 ± 0.883	$-0.005, 11.032$	3	262.5
4. Jackson	3, 10, 20	315.000 ± 0.000	315.000 ± 1.030	$0.000, 12.871$	3	130.4
5. Mansoor	3, 10, 20	956.738 ± 5.009	961.837 ± 94.546	$5.099, 215.772$	2	1.5
6. Mitchell	3, 10, 20	585.043 ± 0.009	585.033 ± 1.913	$-0.010, 23.903$	3	672.2
7. Roszieg	3, 10, 20	648.998 ± 0.996	650.070 ± 64.356	$1.072, 146.845$	4	8.8
8. Heskiaoff	3, 10, 20	521.722 ± 2.188	523.138 ± 51.586	$1.416, 117.721$	3	54.2
9. Buxey	3, 10, 20	165.306 ± 0.425	166.481 ± 16.292	$1.175, 37.175$	6	5979.5
10. Sawyer	3, 10, 20	187.500 ± 0.000	187.500 ± 18.852	$0, 000.015$	5	45.4
11. Lutzl	3, 10, 20	724.823 ± 1.771	727.573 ± 71.097	$2.750, 16.223$	5	55.9
12. Gunther	3, 10, 20	248.265 ± 1.524	248.861 ± 24.434	$0.596, 55.767$	6	3379.5
13. Kilbridge	3, 10, 20	279.100 ± 0.561	282.794 ± 27.757	$3.694, 63.336$	3	147.9
14. Hahn	3, 10, 20	717.901 ± 5.420	716.130 ± 70.528	$-1.771, 160.996$	3	19.8
15. Tonge	3, 10, 20	184.461 ± 0.006	184.614 ± 18.546	$0.153, 42.316$	7	1541.0

TABLE 3.8 – Résultats d’optimisation de la phase d’équilibrage des charges.

	λ	Objectif	Ré-affectation	temps(s)
1. Mertens	1000	1.21	1	1.8
2. Bowman	1000	11.13	0	106.1
3. Jaeschke	1000	1.21	1	31.0
4. Jackson	1000	1.25	1	55.3
5. Mansoor	1000	5.73	1 ⁺	2.5
6. Mitchell	1000	1.80	1 ⁺	81.9
7. Roszieg	1000	2.28	0	1413.6
8. Heskiaoff	1000	16.23	1 ⁺	509.2

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les problèmes de conception et d’équilibrage des lignes de désassemblage sous incertitudes ont été étudiés. Les cas de désassemblage partiel et présence de matières dangereuses ont été considérés. Les durées opératoires des tâches de désassemblage ont été prises pour des variables aléatoires avec des lois de probabilité connues. Pour aborder les deux problèmes étudiés prenant en compte la qualité des solutions obtenues, une approche à deux phases a été élaborée.

Dans la première phase, un programme stochastique mixte à deux stages avec recours fixe et la procédure de résolution d’approximation moyenne par échantillonnage (AME) ont été proposés pour maximiser le profit de la ligne. La procédure AME intègre l’algorithme L-shaped avec deux techniques de simulation Monte Carlo. Cette approche de résolution permet d’obtenir des bornes inférieure et supérieure des valeurs optimales des problèmes résolus ainsi que des intervalles de confiance associés de niveau 95%. Les écarts d’optimalité et leurs écarts types sont également fournis.

Dans la deuxième phase, une formulation en programme stochastique et une borne supérieure, de la valeur optimale de ce programme, ont été développés pour l’équilibrage des charges des postes de travail de la ligne obtenue dans la phase 1.

L’approche élaborée a été testée sur des instances de la littérature pour le cas de désassemblage mais aussi d’assemblage. Les résultats obtenus en phase 1 ont montré que pour atteindre des solutions de bonne qualité, des échantillons aléatoires de grandes tailles sont requis. Dans la phase 2, tous les problèmes ont été résolus en un temps réduit. Les résultats obtenus ont montré que pour certaines instances, le coût de recours peut être amélioré grâce à la phase 2.

Chapitre 4

Approximation du problème de conception des lignes de désassemblage sous incertitudes par la programmation conique de second ordre

Sommaire

4.1	Introduction	71
4.2	Modélisation du problème	72
4.2.1	Programme stochastique avec contraintes conjointement probabilisées	72
4.2.2	Équilibrage des charges des postes de travail de la ligne	73
4.3	Approche de résolution par la programmation conique et l'approximation de fonctions	74
4.3.1	Borne supérieure du profit de la ligne	77
4.3.2	Bornes inférieures du profit de la ligne	78
4.4	Résultats numériques	81
4.5	Conclusion	87

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé le problème de conception des lignes de désassemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches, dont l'objectif était de maximiser le profit généré par les produits désassemblés. Les durées opératoires ont été prises pour des variables aléatoires indépendantes avec des lois de probabilités connues. Un coût de recours a été introduit au niveau de chaque poste de travail afin de limiter les violations des contraintes du temps de cycle.

A la différence du précédent chapitre, nous nous intéressons ici au cas où un niveau de fonctionnement de la ligne (taux de service) est fixé par le décideur. Pour modéliser ce problème, un programme stochastique binaire avec contraintes conjointes probabilistes est proposé. Les durées opératoires des tâches sont prises pour des variables aléatoires normales indépendantes et connues. Différentes bornes inférieures et une borne supérieure seront développées pour approximer le problème étudié en utilisant la programmation conique de second ordre et l'approximation linéaire par morceaux de fonctions. Ces bornes seront également valables pour le cas d'assemblage.

Un programme stochastique pour l'équilibrage des charges des postes de travail issus du problème de conception sera également étudié.

4.2 Modélisation du problème

Les paramètres et les variables de décision sont les mêmes que précédemment. La différence principale réside dans les contraintes du temps de cycle. Ces dernières sont à satisfaire conjointement avec une certaine probabilité au moins $(1 - \alpha)$ fixée par le décideur. Ainsi, le décideur cherche à concevoir une ligne de désassemblage maximisant son profit, sans tenir compte du coût de recours, mais qui garantirait un niveau de fonctionnement souhaité.

4.2.1 Programme stochastique avec contraintes conjointement probabilisées

Pour le problème de conception défini ci-dessus, le programme stochastique avec Contraintes Conjointement Probabilisées (**CCP**) ci-après est proposé.

$$\max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} - \left[C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) \right] \right\} \quad (\text{CCP})$$

s.c.

$$\sum_{i \in S_0} \sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad (3.1)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1, \forall i \in I \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in S_k} \sum_{j \in J} x_{ij} \leq \sum_{i \in P_k} \sum_{j \in J} x_{ij}, \forall k \in K \setminus \{0\} \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in S_k} x_{iv} \leq \sum_{i \in P_k} \sum_{j=1}^v x_{ij}, \forall k \in K \setminus \{0\}, \forall v \in J \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in J} x_{sj} = 1 \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in J} j \cdot x_{ij} \leq \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj}, \forall i \in I \quad (3.6)$$

$$h_j \geq x_{ij}, \forall j \in J, \forall i \in I \quad (3.7)$$

$$P\left(\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij} \leq C_t, \forall j \in J\right) \geq 1 - \alpha \quad (4.1)$$

$$x_{sj}, x_{ij}, h_j \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.9)$$

Rappelons que les termes de la fonction objectif représentent, respectivement, les revenus des produits désassemblés, le coût opérationnel des postes de travail et le coût de traitement des matières dangereuses. Contrairement au problème du chapitre précédent, il n'y a pas de terme de coût de recours. L'inégalité (4.1) impose la satisfaction conjointe des contraintes de cadence de la ligne avec un niveau de probabilité au moins égale à $(1 - \alpha)$.

4.2.2 Équilibrage des charges des postes de travail de la ligne

À l'issue de la résolution du problème (CCP), une première configuration de la ligne de désassemblage est définie.

Comme dans le chapitre précédent, soient $m^* \leq |J|$ le nombre de postes de travail de la ligne définie, $I^* \subset I$ les tâches de désassemblage sélectionnées, $J^* = \{1, 2, \dots, m^*\}$, $ST_j(\tilde{\xi}) = \sum_{i \in I^*} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij}$, $\forall j \in J^*$ et $\text{Pred}(i) = \{i' \in I^* \mid i' \text{ précède } i\}$, $i \in I^*$. Le Maximum des valeurs Absolues des différences des espérances Mathématiques des Charges entre tous les postes de travail est minimisé dans le programme (MAMC) ci-dessous.

$$\min \max_{\forall j, j' \in J^*, j \neq j'} \left| \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(ST_j(\tilde{\xi})) - \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(ST_{j'}(\tilde{\xi})) \right| \quad (\text{MAMC})$$

s.c.

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J^*} x_{ij} &= 1, \forall i \in I^* \\ \sum_{j \in J^*} j \cdot x_{ij} &\leq \sum_{j \in J^*} j \cdot x_{ij'}, \forall i \in I^*, \forall i' \in \text{Pred}(i) \\ x_{ij} &\in \{0, 1\}, \forall i \in I^*, \forall j \in J^* \end{aligned}$$

Soient $\mathcal{B} = \{1, 2, \dots, B\}$, $B \in \mathbb{N}^*$ et $S_l(\tilde{\xi}) = (ST_j(\tilde{\xi}) - ST_{j'}(\tilde{\xi}), j, j' \in J^*, j \neq j'), l \in \mathcal{B}$, où $B = \binom{2}{|J^*|}$; pour chaque valeur de l est associé un couple $(j, j'), j, j' \in J^*, j \neq j'$. Alors :

$$\omega_l = \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(S_l(\tilde{\xi})) = \left(\sum_{i \in I^*} \mu_i \cdot x_{ij} - \sum_{i \in I^*} \mu_i \cdot x_{ij'}, j, j' \in J^*, j \neq j' \right), l \in \mathcal{B}$$

Ainsi, le programme (**MAMC'**) ci-après représente une version linéarisée du programme (**MAMC**).

$$\begin{aligned}
 & \min Y && (\text{MAMC}') \\
 & \text{s.c.} \\
 & \sum_{j \in J^*} x_{ij} = 1, \forall i \in I^* \\
 & \sum_{j \in J^*} j \cdot x_{ij} \leq \sum_{j \in J^*} j \cdot x_{ij}, \forall i \in I^*, \forall i' \in \text{Pred}(i) \\
 & -Y \leq \omega_l \leq Y, \forall l \in \mathcal{B} \\
 & Y \geq 0, x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I^*, \forall j \in J^*
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Les contraintes (4.2) peuvent être remplacées par :

$$\begin{aligned}
 e_l + \omega_l &= Y, \forall l \in \mathcal{B} \\
 0 &\leq e_l \leq 2Y, \forall l \in \mathcal{B}
 \end{aligned}$$

Dans cette étape d'équilibrage des charges, la probabilité de satisfaire conjointement les contraintes du temps de cycle peuvent croître ou décroître dépendant des ré-affectations possibles des tâches I^* . La ré-affectation des tâches dangereuses n'est pas autorisée. Par conséquent, la valeur optimale du problème (**CCP**) reste inchangée sauf si l'accroissement ou décroissement de cette probabilité peut être interprété comme un profit ou coût supplémentaire, respectivement.

Soient x^1 et x^2 , respectivement, des solutions optimales des problèmes (**CCP**) et (**MAMC**) et P_1 , P_2 les probabilités correspondantes de satisfaction conjointe des contraintes du temps de cycle. Alors, la solution x^2 est acceptée si

$$\varrho = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \leq \varpi$$

sinon, x^2 est rejetée et x^1 est retenue ; ϖ est un pourcentage fixé par le décideur. Autrement dit, x^2 est retenue comme solution finale si le pourcentage de décroissement de la probabilité dans la phase d'équilibrage ne dépasse pas une certaine valeur ϖ .

L'approche de résolution développée est détaillée dans ce qui suit.

4.3 Approche de résolution par la programmation conique et l'approximation de fonctions

Le problème (**CCP**) est \mathcal{NP} -difficile par restriction. En effet, de la même manière que dans le chapitre précédent, le problème SALBP-1 est un cas particulier de (**CCP**). Afin

de résoudre efficacement ce dernier, plusieurs bornes inférieures et une borne supérieure sont proposées. Ces bornes d'approximation ont été développées en utilisant l'approximation convexe linéaire par morceaux [Boyd & Vandenberghe 2004, Magnani & Boyd 2009] et la programmation conique de second ordre [Lobo *et al.* 1998, Alizadeh & Goldfarb 2003, Nemirovski & Shapiro 2007, Prékopa *et al.* 2011].

Approximation du problème de conception (**CCP**)

Posons $(1-\alpha) = \bar{\alpha}$. Comme les durées des tâches sont prises pour des variables aléatoires indépendantes avec des lois normales connues, alors :

$$P\left(\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij} \leq C_t, \forall j \in J\right) \geq \bar{\alpha} \iff P\left(\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij} \leq C_t\right) \geq \bar{\alpha}^{q_j}, \forall j \in J, \sum_{j \in J} q_j = 1 \quad (4.3)$$

$\forall j \in J :$

$$\begin{aligned} & P\left(\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij} \leq C_t\right) \geq \bar{\alpha}^{q_j} \\ \iff & P\left(\frac{\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij} - \sum_{i \in I} \mu_i \cdot x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i \in I} \sigma_i^2 \cdot x_{ij}^2}} \leq \frac{C_t - \sum_{i \in I} \mu_i \cdot x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i \in I} \sigma_i^2 \cdot x_{ij}^2}}\right) \geq \bar{\alpha}^{q_j} \\ \iff & P\left(Z_j \leq \frac{C_t - \sum_{i \in I} \mu_i \cdot x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i \in I} \sigma_i^2 \cdot x_{ij}^2}}\right) \geq \bar{\alpha}^{q_j}, Z_j \rightsquigarrow \mathcal{N}(0, 1) \\ \iff & \sum_{i \in I} \mu_i \cdot x_{ij} + \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}) \cdot \sqrt{\sum_{i \in I} \sigma_i^2 \cdot x_{ij}^2} \leq C_t \end{aligned}$$

L'équivalence (4.3) est proposée dans [Cheng & Lissner 2012] pour le cas continu ; $\Phi^{-1}(t)$ est l'inverse de la fonction de répartition de la loi normale $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{r^2}{2}} dr, t \in \mathbb{R}$.

Soient x le vecteur des variables de décision $x_{ij}, x_{sj}, h_j, \forall i \in I, \forall j \in J$ et $X = \{x \mid \text{les contraintes (3.1)-(3.7) et (3.9) sont satisfaites}\}$. Utilisant le résultat ci-dessus, le problème (**CCP**) est équivalent au problème (**CCP'**) :

$$\max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} - \left[C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) \right] \right\} \quad (\text{CCP}')$$

s.c.

$$\sum_{i \in I} \mu_i \cdot x_{ij} + \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}) \cdot \sqrt{\sum_{i \in I} \sigma_i^2 \cdot x_{ij}^2} \leq C_t, \forall j \in J \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J} q_j &= 1 \\ x &\in X, q_j \geq 0, \forall j \in J \end{aligned}$$

Les inégalités (4.4) sont des contraintes convexes coniques de second ordre. En effet, soit $(v, w) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^{l-1}$, alors

$$\mathcal{Q}^l = \left\{ \begin{pmatrix} w \\ v \end{pmatrix} \mid v \geq \|w\| \right\}$$

définit un cône convexe unitaire de second ordre de dimension l ; $\|\cdot\|$ fait référence à la norme euclidienne standard. Vu que $\alpha < 50\%$ (généralement $\alpha \leq 10\%$), alors $\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}) > 0$, d'où (4.4) représentent des contraintes coniques de second ordre de dimension $l = |I| + 1$:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} \mu_i \cdot x_{ij} + \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}) \cdot \sqrt{\sum_{i \in I} \sigma_i^2 \cdot x_{ij}^2} &\leq C_t, \forall j \in J \\ \iff \|\Sigma^{\frac{1}{2}} \cdot x_j\| &\leq \frac{1}{\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j})} \cdot (C_t - \mu^\top \cdot x_j), \forall j \in J \\ \iff \left\{ \begin{pmatrix} \Sigma^{\frac{1}{2}} \\ -\mu^\top \\ \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}) \end{pmatrix} x_j + \begin{pmatrix} 0 \\ C_t \\ \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}) \end{pmatrix} \right\} &\in \mathcal{Q}^{|I|+1}, \forall j \in J \end{aligned}$$

où $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_{|I|})$, $x_j = (x_{1j}, \dots, x_{|I|j})^\top, \forall j \in J$; $\Sigma^{\frac{1}{2}} = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_{|I|})$ est une matrice diagonale.

Le programme mixte Conique de Second Ordre (**CSO**) donné ci-dessous représente une version équivalente du problème (**CCP'**).

$$\max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} - \left[C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) \right] \right\} \quad (\text{CSO})$$

s.c.

$$\begin{aligned} v_j &\leq \frac{1}{\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j})} \cdot (C_t - \mu^\top \cdot x_j), \forall j \in J \\ w_{ij} &\geq \sigma_i \cdot x_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J \\ v_j &\geq \|w_j\|, \forall j \in J \\ \sum_{j \in J} q_j &= 1 \\ x &\in X, v_j \geq 0, w_{ij} \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J \end{aligned}$$

où $v_j, w_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J$ sont des variables intermédiaires et $w_j = (w_{1j}, \dots, w_{|I|j})^\top, \forall j \in J$.

Pour faciliter la lecture et du fait que

$$\max \varphi(x) = - \min (- \varphi(x))$$

où $\varphi(x)$ est une fonction de variables x , pour approximer le problème (**CSO**), sa version de minimisation

$$\min \left\{ C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} \right\} \quad (4.5)$$

sera utilisée. La valeur optimale de (**CSO**) sera donc la valeur symétrique de (4.5). Notons cette version de minimisation (**M-CSO**).

4.3.1 Borne inférieure de (M-CSO)

Les problèmes avec contraintes probabilisées disjointes sont largement étudiés dans la littérature [Watanabe & Ellis 1994, DePaolo & Rader Jr. 2007, Poojari & Varghese 2008, Mesfin & Shuhaimi 2010, Shen *et al.* 2010, Blackmore *et al.* 2011, Zhang & Li 2011, Zorgati & Van Ackooij 2011, Nemirovski 2012, Branda 2012, Liu *et al.* 2013, Reich 2013]. Un cas spécial de programmes linéaires continus avec contraintes conjointement probabilisées a été étudié dans [Cheng & Lisser 2012]. Les coefficients de la matrice des contraintes ont été supposés des variables aléatoires avec des lois connues et les vecteurs lignes considérés comme indépendants. Dans le cas étudié ici, les coefficients sont représentés par les durées opératoires des tâches et chaque vecteur ligne est composé des durées opératoires des tâches qui lui sont affectées. Il est clair que ces vecteurs sont mutuellement indépendants car les durées opératoires des tâches sont supposées indépendantes. Ainsi, les principaux résultats des approximations dans [Cheng & Lisser 2012] pour le cas continu restent valides pour le problème (**M-CSO**) avec des variables binaires 0-1.

Approximation tangente linéaire par morceaux de $\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^q)$

L'approximation tangente par morceaux de $\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^q)$ est utile pour la définition d'une borne inférieure de (**M-CSO**), qui définit une borne supérieure de (**CSO**) et donc de (**CCP**).

La fonction $\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^q), q \in]0, 1]$ est approximée en utilisant les séries de Taylor de premier ordre et les données d'entrée $(q_j, \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}))$, $j = 1, \dots, m$ (q_j est un point tangent). Supposons que $q_1 < q_2 < \dots < q_m$. Alors, une approximation tangente linéaire par morceaux de $\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^q)$ est donnée comme suit :

$$\begin{aligned}
 g(q) &= \max_{j=1,\dots,m} \{a_j + b_j q\}, q \in]0, 1] \\
 b_j &= (\Phi^{-1})^{(1)}(\bar{\alpha}^{q_j}) \cdot \bar{\alpha}^{q_j} \ln(\bar{\alpha}), j = 1, \dots, m \\
 a_j &= \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}) - b_j \cdot q_j, j = 1, \dots, m \\
 (\Phi^{-1})^{(1)}(\bar{\alpha}^{q_j}) &= \frac{1}{f(\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}))}, j = 1, \dots, m
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

où f est la fonction de densité de probabilité de la loi normale.

Utilisant le système (4.6), le programme (**CSOBI**) ci-dessous représente une approximation du problème (**M-CSO**).

$$\min \left\{ C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} \right\} \tag{CSOBI}$$

s.c.

$$\begin{aligned}
 v_j &\leq C_t - \mu^T \cdot x_j, \forall j \in J \\
 w_{ij} &\geq \sigma_i \cdot z_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J \\
 v_j &\geq \|w_j\|, \forall j \in J \\
 z_{ij} &\geq a_k \cdot x_{ij} + b_k \cdot y_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J, k = 1, \dots, m \\
 \sum_{j \in J} y_{ij} &= \sum_{j \in J} o_{ij}, \forall i \in I \\
 o_{ij} &\leq x_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J \\
 o_{ij} &\leq q_j, \forall i \in I, \forall j \in J \\
 q_j + x_{ij} &\leq 1 + o_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J \\
 \sum_{j \in J} q_j &= 1 \\
 x &\in X, v_j, q_j, y_{ij}, w_{ij}, o_{ij}, z_{ij} \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J
 \end{aligned}$$

Plus précisément, la valeur optimale de (**CSOBI**) définit une borne inférieure de (**M-CSO**); c'est une borne supérieure de (**CCP**) et aussi de (**CSO**). Cette borne est basée sur celle proposée dans [Cheng & Lisser 2012] pour le cas continu.

4.3.2 Bornes supérieures de (M-CSO)

Dans cette sous-section, 4 approximations de (**M-CSO**) sont proposées. La valeur de chacune définit une borne supérieure pour le programme considéré. Ces dernières sont basées sur l'inégalité de Bonferroni [Galambos 1977], l'approximation de Jagannathan [Jagannathan 1974], une autre borne proposée dans [Cheng & Lisser 2012] et une variante

de l'approximation de Bonferroni. Une approximation sécante linéaire par morceaux de $\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^q)$ est d'abord donnée.

Approximation sécante linéaire par morceaux de $\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^q)$

Comme $\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^q), q \in]0, 1]$ est convexe, alors, les données d'entrée $(q_j, \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}))$, $j = 1, \dots, m$ (q_j est un point de la fonction), il s'ensuit une approximation sécante linéaire par morceaux g de la fonction $\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^q)$:

$$\begin{aligned} g(q) &= \max_{j=1, \dots, m-1} \{a_j + b_j q\}, q \in]0, 1] \\ a_j &= \frac{q_{j+1} \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j}) - q_j \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_{j+1}})}{q_{j+1} - q_j}, j = 1, \dots, m-1 \\ b_j &= \frac{\Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_{j+1}}) - \Phi^{-1}(\bar{\alpha}^{q_j})}{q_{j+1} - q_j}, j = 1, \dots, m-1 \\ q_1 &< q_2 < \dots < q_m, q_j \in]0, 1], j = 1, \dots, m \end{aligned} \tag{4.7}$$

La première borne supérieure (**CSOBS1**) de (**M-CSO**) est définie en remplaçant les valeurs (a_k, b_k) dans (**CSOBI**) par leurs valeurs définies dans (4.7). Cette approximation, basée sur celle proposée dans [Cheng & Lisser 2012] pour le cas continu, définit une borne supérieure de (**M-CSO**) si

$$\gamma = \prod_{j \in J} \Phi\left(\frac{C_t - \mu^T \cdot x_j}{\|\Sigma^{\frac{1}{2}} \cdot x_j\|}\right) \geq 1 - \alpha$$

La deuxième borne supérieure (**CSOBS2**) est basée sur l'inégalité de Bonferroni, elle est définie comme suit :

$$\min \left\{ C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} \right\} \tag{CSOBS2}$$

s.c.

$$v_j \leq \frac{1}{\Phi^{-1}(1 - \alpha_j)} \cdot (C_t - \mu^T \cdot x_j), \forall j \in J$$

$$w_{ij} \geq \sigma_i \cdot x_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$v_j \geq \|w_j\|, \forall j \in J$$

$$x \in X$$

$$v_j, w_{ij} \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J$$

où $\alpha_j, \forall j \in J$ sont des paramètres vérifiant $\sum_{j \in J} \alpha_j = \alpha$.

La troisième borne supérieure (**CSOBS3**) de (**M-CSO**) est définie en remplaçant les valeurs de $(1 - \alpha_j)$ dans (**CSOBS2**) par $(\bar{\alpha}^{q_j})$ respectivement ; $q_j, \forall j \in J$ sont des paramètres vérifiant $\sum_{j \in J} q_j = 1$.

La quatrième et la dernière borne supérieure (**CSOBS4**) est basée sur l'approximation de Jagannathan, elle est donnée ci-dessous.

$$\min \left\{ C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} \right\} \quad (\text{CSOBS4})$$

s.c.

$$\begin{aligned} \mu^\top \cdot x_j + o_j \cdot \beta_j &\leq C_t, \forall j \in J \\ (x_j^\top \cdot \Sigma \cdot x_j)^{\frac{1}{2}} &\leq \beta_j, \forall j \in J \\ \sum_{j \in J} \ln(\Phi(o_j)) &\geq \ln(1 - \alpha) \\ x &\in X, o_j \geq 0, \forall j \in J \end{aligned} \quad (4.8)$$

où $\Phi(t) = P(Z \leq t)$, $Z \rightsquigarrow \mathcal{N}(0, 1)$ et $\beta_j, \forall j \in J$ sont des paramètres qui jouent un rôle important dans le résultat de cette approximation [Jagannathan 1974]. La fonction $\ln(\Phi(o_j)), j \in J$ est à approximer en utilisant une fonction convexe linéaire par morceaux afin de résoudre le problème (**CSOBS4**). La fonction $\ln(\Phi(o_j)), j \in J$ est concave, d'où $\ln(\frac{1}{\Phi(o_j)})$ est convexe. La contrainte(4.8) peut être réécrite de manière équivalente comme suit :

$$\sum_{j \in J} \ln\left(\frac{1}{\Phi(o_j)}\right) \leq \ln\left(\frac{1}{1 - \alpha}\right)$$

Lemme. Pour les données d'entrée $(q_j, \ln(\frac{1}{\Phi(q_j)}))$, $j = 1, \dots, m$, la fonction g définie ci-après est une approximation convexe linéaire par morceaux de $\ln(\frac{1}{\Phi(q)})$, $q \geq 0$:

$$g(q) = \max_{j=1, \dots, m-1} \{a_j + b_j q\}, q \geq 0 \quad (4.9)$$

$$a_j = \frac{q_{j+1} \ln\left(\frac{1}{\Phi(q_j)}\right) - q_j \ln\left(\frac{1}{\Phi(q_{j+1})}\right)}{q_{j+1} - q_j}, j = 1, \dots, m-1$$

$$b_j = \frac{\ln\left(\frac{1}{\Phi(q_{j+1})}\right) - \ln\left(\frac{1}{\Phi(q_j)}\right)}{q_{j+1} - q_j}, j = 1, \dots, m-1$$

$$q_1 < q_2 < \dots < q_m, q_j \geq 0, j = 1, \dots, m$$

Démonstration. Simple du fait que $\ln(\frac{1}{\Phi(q)}), q \geq 0$ est convexe. □

La contrainte (4.8) est alors remplacée par :

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J} w_j &\leq \ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\right) \\ w_j &\geq a_k + b_k \cdot o_j, \forall j \in J, k = 1, \dots, m-1 \\ w_j &\geq 0, \forall j \in J \end{aligned}$$

4.4 Résultats numériques

Les problèmes **(CSOBI)**, **(CSOBS1)**, **(CSOBS2)**, **(CSOBS3)**, **(CSOBS4)** et **(MAMC')** ont été implémentés sous MS Visual C++. Le solveur ILOG CPLEX 12.4 a été utilisé pour résoudre les différents modèles sur une machine Pentium(R) Dual-Core CPU T4500, 2.30 GHz et 3GB RAM. Ces différents modèles ont été appliqués aux mêmes instances de la littérature introduites dans la section 3.4 (Tableau 3.1). Ces dernières ont été mises à jour au niveau du temps de cycle et sont regroupées dans le Tableau 4.1 ci-dessous.

Le Tableau 4.2 rapporte les résultats de la partie conception de la ligne de désassemblage en utilisant la borne supérieure et la première borne inférieure proposées, c.-à-d. les valeurs symétriques des valeurs optimales des programmes **(CSOBI)** et **(CSOBS1)**, respectivement. Appelons ces deux bornes comme bornes principales. Le nombre de points n_{pts} considérés pour l'approximation convexe linéaire par morceaux a été fixé à 15, α à 5%, le premier point des données d'entrée à 0.0001 et 25% des tâches ont été prises aléatoirement comme dangereuses. Tous les points échantillonnés pour l'approximation étaient équidistants. Les paramètres restants ont été générés aléatoirement.

Les colonnes 'BS' et 'BI' contiennent, respectivement, les valeurs des bornes supérieures et inférieures. La colonne 'Écart-opt.' représente l'écart d'optimalité $\frac{UB-LB}{LB}$. Les colonnes

TABLE 4.1 – Instances de désassemblage considérées.

	I	K	L	arcs	relations ET			J	C _t
					0	1	2		
MJKL11	37	22	33	76	4	27	6	10	40
BBD13a	32	14	23	60	4	28	0	4	0.80
L99a	30	18	28	60	2	26	2	9	50
BBD13b	25	11	27	49	4	18	3	4	120
KSE09	23	13	20	47	4	14	5	6	20
L99b	20	13	23	41	5	9	6	9	10
BBD13	10	5	12	18	3	6	1	3	0.61

‘ m^* ’, ‘ $|I^*|$ ’, ‘postes-D.’ et ‘temps(s)’ rapportent, respectivement, le nombre de postes de travail retourné, le nombre de tâches sélectionnées, les nombre de postes traitant des matières dangereuses et le temps de résolution en secondes ; $\gamma = \prod_{j \in J} \Phi\left(\frac{c_t - \mu^T x_j}{\|\Sigma^{\frac{1}{2}} \cdot x_j\|}\right)$. Dans tous les tableaux, le tiret ‘-’ signifie que la valeur correspondante n’existe pas.

Les résultats obtenus montrent que, pour chaque instance du problème, la ligne à concevoir est constituée d’au moins 2 postes de travail. Cependant, un poste fixe peut être préférable dans certains cas comme le montre l’instance KSE09. Toutes les instances ont été résolues à l’optimum.

Le Tableau 4.3 présente les résultats des bornes inférieures BI_{Bon} , BI_{vBon} et BI_{Jag} de (CSO) qui représentent, respectivement, les valeurs symétriques des valeurs optimales de (CSOBS2), (CSOBS3) et (CSOBS4). Le nombre de points échantillonnés pour l’approximation de fonctions était fixé à 15. Les valeurs BI_{Bon} et BI_{vBon} ont été calculées pour $\alpha_j = \frac{\alpha}{|J|}, \forall j \in J$ et $q_j = \frac{1}{|J|}, \forall j \in J$, respectivement ; BI_{Jag} a été calculée pour

TABLE 4.2 – Résultats d’optimisation : bornes inférieure et supérieure principales.

	m^*	BS	$ I^* $	postes-D.	temps(s)	BI	$ I^* $	postes-D.	temps(s)	$\gamma\%$	Écart-Opt. %
MJKL11	3	199	6	1	2.277	199	6	1	1.654	99.5	0
BBD13a	2	178.6	2	1	0.01	178.6	2	1	0.02	98.9	0
L99a	3	48	7	-	0.218	48	7	-	0.312	98.2	0
BBD13b	2	13	3	-	0.062	13	3	-	0.094	98.7	0
KSE09	1	590	4	-	0.001	590	4	-	0.016	97.3	0
L99b	2	25	6	-	0.062	25	6	-	0.078	99.4	0
BBD13	2	84.0	3	1	0.078	84.0	3	1	0.202	99.6	0

TABLE 4.3 – Résultats d’optimisation : autres bornes inférieures.

	m^*	BI_{Jag}	temps(s)	BI_{Bon}	temps(s)	BI_{vBon}	temps(s)
MJKL11	3	199	0.484	199	0.828	199	0.577
BBD13a	2	178.6	0.02	178.6	0.02	178.6	0.02
L99a	3	48	0.047	48	0.079	48	0.077
BBD13b	2	13	0.016	13	0.015	13	0.031
KSE09	1	360	0.016	590	0.016	590	0.016
L99b	2	25	0.031	25	0.015	25	0.015
BBD13	2	84.0	0.062	84.0	0.062	84.0	0.062

$\beta_j = (x_{j,\text{Bon}}^\top \cdot \Sigma \cdot x_{j,\text{Bon}})^{\frac{1}{2}}, \forall j \in J$, où $x_{j,\text{Bon}}, j \in J$ correspond à une solution optimale de **(CSOBS2)**. Ce choix des valeurs des paramètres β_j a été fait afin d'éviter les cas d'infaisabilité en résolvant **(CSOBS4)**.

Les résultats du Tableau 4.3 montrent qu'à l'exception de la valeur objectif de l'instance KSE09, les valeurs optimales retournées sont également optimales pour **(CSO)**. Les programmes **(CSOBS2)** et **(CSOBS3)** ont retourné les valeurs optimales de **(CSO)** pour toutes les instances sans exception.

Le Tableau 4.4 vise à analyser l'impact, sur les valeurs des fonctions objectifs, du nombre de points de l'approximation convexe linéaire par morceaux utilisée pour approximer et linéariser les fonctions non linéaires des programmes **(CSOBI)** et **(CSOBS1)**. Les résultats obtenus montrent que même pour un nombre de points d'interpolation égal à 5, les valeurs optimales pour **(CSO)** ont été trouvées.

Le Tableau 4.5 rapporte les résultats d'optimisation de la partie d'équilibrage des charges des postes de travail des lignes issues de l'étape précédente. Dans cette partie, le programme **(MAMC')** a été résolu. Une ré-affectation des tâches de désassemblage est représentée par la valeur 1 dans la colonne 'ré-affectation'. Cette même valeur est notée 1^+ si la ré-affectation correspondante conduit à $P_2 > P_1$, où

$$P_1 = \prod_{j \in J} \Phi\left(\frac{C_t - \mu^\top \cdot x_j^1}{\|\Sigma^{\frac{1}{2}} \cdot x_j^1\|}\right)$$

et

$$P_2 = \prod_{j \in J} \Phi\left(\frac{C_t - \mu^\top \cdot x_j^2}{\|\Sigma^{\frac{1}{2}} \cdot x_j^2\|}\right)$$

Dans ce cas de figure, x^2 , c.-à-d. la solution de la partie d'équilibrage, est retenue sans hésitation. Les résultats obtenus montrent que, pour l'instance BBD13b, la ré-affectation des tâches a conduit à $P_2 > P_1$. Par conséquent, la solution x^2 de l'étape d'équilibrage des charges devrait être retenue comme solution finale.

TABLE 4.4 – Résultats d’optimisation des bornes principales : impact sur la valeur optimale de la variation de la précision d’approximation.

	n_{Pts}	BS temps(s)	BI temps(s)	$\gamma\%$	$\hat{\text{Exact-Opt.}}\%$
MJKL11	5	199 2.659	199 2.044	99.5	0
	10	199 3.026	199 2.668	99.5	0
	20	199 4.336	199 5.678	99.5	0
BBD13a	5	178.6 0.01	178.6 0.02	98.9	0
	10	178.6 0.01	178.6 0.02	98.9	0
	15	178.6 0.02	178.6 0.03	98.9	0
L99a	5	48 0.109	48 0.109	98.2	0
	10	48 0.171	48 0.327	98.2	0
	20	48 0.311	48 0.235	98.2	0
BBD13b	5	13 0.016	13 0.047	98.7	0
	10	13 0.078	13 0.031	98.7	0
	20	13 0.063	13 0.093	98.7	0
KSE09	5	250 0.046	250 0.082	99.9	0
	10	250 0.094	250 0.062	99.9	0
	20	250 0.187	250 0.093	99.9	0
L99b	5	25 0.031	25 0.031	99.4	0
	10	25 0.047	25 0.031	99.4	0
	20	25 0.062	25 0.062	99.4	0
BBD13	5	80.3 0.062	80.3 0.047	99.9	0
	10	80.3 0.110	80.3 0.047	99.9	0
	20	80.3 0.094	80.3 0.062	99.9	0

TABLE 4.5 – Résultats d’optimisation : équilibrage des charges.

	m^*	val.-obj.	ré-affectation	temps(s)
MJKL11	3	16.00	0	0.016
BBD13a	2	0.03	0	0.01
L99a	3	7.00	0	0.031
BBD13b	2	26.00	1 ⁺	0.001
L99b	2	0.70	0	0.016
BBD13	2	0.07	0	0.001

Résultats d'optimisation pour le problème SALBP-1 avec contraintes conjointement probabilisées

Les 25 instances utilisées sont disponibles sur le site internet <http://alb.mansci.de> et sont détaillées dans le Tableau 4.6.

La phase de minimisation du nombre de postes est d'abord résolue pour $|J| = |\underline{J}|$, et si le problème correspondant n'est pas réalisable pour $|\underline{J}|$ postes, alors il est résolu pour $|\underline{J}| + 1$, etc., jusqu'à ce que le problème soit faisable. Notons qu'avec cette procédure, si le problème est réalisable pour un nombre de postes $|\underline{J}| + k$, alors ce dernier représente le nombre minimal (optimal) de postes de travail de la ligne.

Le Tableau 4.7 rapporte les résultats de l'optimisation de la phase de minimisation du nombre de postes de travail en utilisant les deux bornes principales. Les colonnes ' $|\bar{J}^*|$ ', ' $|\underline{J}^*|$ ', 'Écart-opt.' et 'temps(s)' font référence, respectivement, au nombre de postes retourné par la borne supérieure, au nombre de postes retourné par la borne inférieure, l'écart d'optimalité $\frac{|\bar{J}^*| - |\underline{J}^*|}{|\underline{J}^*|}$ et le temps de résolution en secondes; ' γ ' est $\prod_{j \in J} \Phi\left(\frac{C_t - \mu^T \cdot x_j}{\|\Sigma^{\frac{1}{2}} \cdot x_j\|}\right)$.

Comme montré dans le Tableau 4.7, les valeurs optimales des bornes inférieures et supérieures sont obtenues pour toutes les instances, pour la plupart en moins d'une heure. Cependant, pour certaines instances, comme Arcus1 et Arcus2, une solution optimale n'a pas pu être obtenue qu'après 1 heure de résolution. Le problème SALBP-1 avec contraintes conjointement probabilisées est résolu à l'optimum pour la majorité des instances.

Les résultats d'optimisation de la phase d'équilibrage des charges sont regroupés dans le Tableau 4.8. Les instances dont une solution optimale pour la première phase a été trouvée en moins d'une heure sont les seules considérées à cette étape. Pour toutes les instances résolues, à l'exception de Mertens, la probabilité de satisfaire conjointement les contraintes du temps de cycle a été améliorée. Par conséquent, pour ces dernières, une solution optimale

TABLE 4.6 – Instances du problème SALBP-1 avec contraintes conjointement probabilisées.

	$ I $	$ \underline{J} $	C_t		$ I $	$ \underline{J} $	C_t		$ I $	$ \underline{J} $	C_t
1. Mertens	7	2	18	9. Buxey	29	6	54	17. Wee-mag	75	32	47
2. Bowman	8	4	20	10. Sawyer	30	5	75	18. Arcus1	83	7	10816
3. Jaeschke	9	3	18	11. Lutz1	32	5	2828	19. Lutz2	89	24	21
4. Jackson	11	3	21	12. Gunther	35	6	81	20. Lutz3	89	11	150
5. Mansoor	11	2	94	13. Kilbridge	45	3	184	21. Mukherje	94	12	351
6. Mitchell	21	3	39	14. Hahn	53	3	4676	22. Arcus2	111	9	17067
7. Roszieg	25	4	32	15. Warnecke	58	14	111	23. Barthol2	148	25	170
8. Heskiaoff	28	3	342	16. Tonge	70	7	527	24. Barthold	148	7	805
25. Scholl	297	25	2787								

de la seconde phase est préférable à celle de la première phase. Rappelons que pour ce cas de figure, la valeur optimale de la fonction objectif reste inchangée mais les charges des postes sont mieux équilibrées. Les résultats obtenus montrent aussi que même si $P_1 > P_2$ pour l'instance Mertens, la valeur ϱ de décroissement de la probabilité de satisfaction des contraintes du temps de cycle est plus petite que le niveau ϖ fixé par le décideur. Ainsi, une solution optimale de la phase d'équilibrage des charges pour l'instance Mertens est retenue comme solution finale.

TABLE 4.7 – Résultats d'optimisation avec les bornes principales.

	$BS : \bar{J}^* $	temps(s)	$BI : J^* $	temps(s)	$\gamma\%$	Écart-opt. %
1. Mertens	2	0.92	2	0.17	99.97	0
2. Bowman	6	0.42	5	0.41	96.12	20
3. Jaeschke	3	0.09	3	0.20	98.14	0
4. Jackson	3	0.20	3	0.22	99.97	0
5. Mansoor	3	0.20	3	0.23	96.60	0
6. Mitchell	3	0.17	3	0.36	96.67	0
7. Roszieg	5	1.25	5	0.90	99.81	0
8. Heskiaoff	4	1.78	4	2.82	99.20	0
9. Buxey	8	3008.46	7	2.17	99.74	14.3
10. Sawyer	5	1.37	5	1.03	97.79	0
11. Lutz1	6	10.31	6	6.29	98.51	0
12. Gunther	8	384.71	7	56.61	98.74	14.3
13. Kilbridge	4	3.82	4	2.54	99.99	0
14. Hahn	4	1.33	4	1.28	96.48	0
15. Warnecke	15	> 3600	15	> 3600	-	-
16. Tonge	8	> 3600	8	2921.43	98.65	0
17. Wee-mag	33	> 3600	33	> 3600	-	-
18. Arcus1	8	> 3600	8	454.21	96.27	0
19. Lutz2	25	> 3600	25	> 3600	-	-
20. Lutz3	13	3072.5	12	> 3600	98.91	8.33
21. Mukherje	13	> 3600	13	> 3600	-	-
22. Arcus2	10	> 3600	10	> 3600	-	-
23. Barthol2	26	> 3600	26	> 3600	-	-
24. Barthold	8	294.51	8	265.61	96.57	0
25. Scholl	26	> 3600	26	> 3600	-	-

TABLE 4.8 – Résultats d'optimisation de l'équilibrage des charges.

	Objectif	ré-affectation	temps(s)
1. Mertens	1	1 ⁻	0.03
3. Jaeschke	1	1 ⁺	0.06
4. Jackson	1	1 ⁺	0.09
5. Mansoor	1	1 ⁺	0.05
6. Mitchell	0	1 ⁺	0.06
7. Roszieg	4	1 ⁺	0.49
8. Heskiaoff	0	1 ⁺	0.16
10. Sawyer	1	1 ⁺	4.05
11. Lutzl	148	1 ⁺	1.57
13. Kilbridge	0	1 ⁺	0.31
14. Hahn	665	1 ⁺	0.95
16. Tonge	1	1 ⁺	152.45
18. Arcusl	290	1 ⁺	> 3600
24. Barthold	—	—	> 3600

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le problème de conception garantissant un certain taux de service de la ligne, fixé par le décideur, et celui d'équilibrage des charges des lignes une fois conçues. Une approche à deux phases a été élaborée.

Dans la première, un programme binaire en 0-1 avec des contraintes conjointement probabilisées ainsi qu'une borne supérieure et quatre bornes inférieures ont été proposés. Ces dernières sont basées sur la programmation conique de second ordre et l'approximation, convexe linéaire par morceaux, de fonctions. Dans la deuxième phase, un programme stochastique binaire en 0-1 a été développé pour l'équilibrage des charges de la ligne issue de la première phase.

L'approche de résolution développée a été appliquée à des instances de la littérature pour le cas de désassemblage et d'assemblage. La majorité des instances ont pu être résolues à l'optimalité avec un temps de calcul raisonnable. La phase de l'équilibrage des charges a permis d'améliorer la distribution du travail entre les postes sans détériorer la probabilité de satisfaction conjointe des contraintes du temps de cycle.

Chapitre 5

Relaxation lagrangienne et simulation Monte Carlo : problèmes de conception des lignes et séquençement des tâches de désassemblage

Sommaire

5.1	Introduction	89
5.2	La relaxation lagrangienne pour la conception des lignes de désassemblage	90
5.2.1	Formulation du problème	90
5.2.2	Les problèmes lagrangien et dual lagrangien	91
5.2.3	L'algorithme du sous-gradient	92
5.3	Intégration des deux problématiques de conception des lignes et de séquençement des tâches de désassemblage	94
5.4	Résultats numériques	96
5.5	Conclusion	100

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons deux formulations pour la conception des lignes de désassemblage où les durées opératoires des tâches sont prises pour des variables aléatoires indépendantes avec des lois de probabilité connues. Nous nous limitons à la considération des espérances mathématiques des charges des postes de travail, c.-à-d., pour un poste donné, la moyenne de la somme des durées opératoires des tâches affectées à ce dernier.

Dans la première modélisation, l'objectif est de maximiser le profit de la ligne, où une

première version de la relaxation lagrangienne est proposée pour résoudre le problème défini. Le but de la deuxième modélisation est d'intégrer les deux problématiques de conception d'une ligne et de séquençement des tâches de désassemblage. Ainsi, en plus d'affecter les tâches aux postes de la ligne à concevoir, cette deuxième formulation permet de définir l'ordre dans lequel elles sont exécutées. Pour les deux modèles, les espérances des charges des postes de travail sont approximées en utilisant la simulation Monte Carlo.

Comme dans les deux chapitres précédents, les modèles et les approches de résolution proposés sont applicables pour le cas d'assemblage.

5.2 La relaxation lagrangienne pour la conception des lignes de désassemblage

La relaxation lagrangienne a été appliquée avec succès à un grand nombre de problèmes d'optimisation combinatoire, comme le problème du voyageur de commerce [Balas & Christofides 1981, Desrosiers *et al.* 1988, Noon & Bean 1991], le problème d'affectation généralisé [Park *et al.* 1998], le problème de localisation [Klinewicz 1986], partitionnement de graphe [Adil & Ghosh 1999], conception de réseau [Holmberg & Yuan 2000], planification de ressources [Lucas *et al.* 2001], etc.

Dans ce chapitre, les paramètres, les variables de décision ainsi que les contraintes de précedence sont les mêmes que dans les deux chapitres précédents. La différence réside dans l'expression des contraintes du temps de cycle où sont considérées les moyennes des charges (temps) des postes de travail.

5.2.1 Formulation du problème

Le programme stochastique avec Espérances des Charges des Postes de travail ci-après représente la première modélisation introduite ci-dessus.

$$Z = \max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} - C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) \right\} \quad (\text{ECP})$$

s.c.

$$\sum_{i \in S_0} \sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad (3.1)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1, \forall i \in I \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in S_k} \sum_{j \in J} x_{ij} \leq \sum_{i \in P_k} \sum_{j \in J} x_{ij}, \forall k \in K \setminus \{0\} \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in S_k} x_{iv} \leq \sum_{i \in P_k} \sum_{j=1}^v x_{ij}, \forall k \in K \setminus \{0\}, \forall v \in J \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in J} x_{sj} = 1 \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in J} j \cdot x_{ij} \leq \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj}, \forall i \in I \quad (3.6)$$

$$h_j \geq x_{ij}, \forall j \in J, \forall i \in H \quad (3.7)$$

$$\mathbb{E}_{\tilde{\xi}} \left(\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij} \right) \leq C_t, \forall j \in J \quad (5.1)$$

$$x_{sj}, x_{ij}, h_j \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.9)$$

Pour rappel, les termes de la fonction objectif représentent, respectivement, les revenus des produits désassemblés, le coût opérationnel des postes de travail et le coût de traitement des matières dangereuses. Pour chaque poste de travail créé $j, j \in J$, la contrainte (5.1) doit être respectée, où le terme à gauche modélise celui de l'espérance mathématique de la charge du poste $j, j \in J$.

5.2.2 Les problèmes lagrangien et dual lagrangien

Soient x le vecteur des variables de décision $x_{ij}, x_{sj}, h_j, \forall i \in I, \forall j \in J$, respectivement, et $X = \{x \mid \text{les contraintes (3.1)-(3.7) et (3.9) sont satisfaites}\}$. Les contraintes du temps de cycle (5.1) représentent des limitations de capacité et constituent des contraintes difficiles du programme (**ECP**). Une des approches les plus efficaces pour la résolution de tels programmes est la relaxation lagrangienne [Shapiro 1979a, Shapiro 1979b, Fisher 1981].

La procédure de la relaxation lagrangienne consiste à éliminer certaines contraintes du problème originel et à introduire des pénalités à la fonction objectif relatives à leurs violations. Dans notre cas, les contraintes à éliminer (5.1) sont celles du temps de cycle et le problème originel est (**ECP**). Le problème (**L-ECP**) qui en résulte est donné ci-après.

$$L(\boldsymbol{\mu}) = \max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} - C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) - \sum_{j \in J} \mu_j \left(\mathbb{E}_{\tilde{\xi}} \left[\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij} \right] - C_t \right) \right\} \quad (\textbf{L-ECP})$$

$$\text{s.c. } x \in X, \mu_j \geq 0, \forall j \in J$$

où $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{|J|})^T$ représente le vecteur de paramètres. Le programme (**L-ECP**) relaxe les contraintes (5.1) en les introduisant dans la fonction objectif avec les scalaires

$\mu_j \geq 0, j \in J$ correspondants ; μ_j est appelé multiplicateur de Lagrange. Il est connu que $L(\boldsymbol{\mu}) \geq Z$. En effet, si x^* est une solution optimale de **(ECP)** alors

$$Z_{x^*} \leq L_{x^*}(\boldsymbol{\mu}) \leq L_{\bar{x}}(\boldsymbol{\mu})$$

où \bar{x} est une solution optimale de **(L-ECP)**. Noter que la valeur de la borne supérieure $L(\boldsymbol{\mu})$ dépend des valeurs des paramètres $\boldsymbol{\mu}$.

Afin de trouver la plus petite borne supérieure, le problème **(D-PSE)** ci-dessous doit être résolu.

$$\bar{L} = \min_{\boldsymbol{\mu} \geq 0} L(\boldsymbol{\mu}) \quad (\text{D-PSE})$$

Le problème **(D-PSE)** est appelé le dual lagrangien du programme **(ECP)**. La relation entre les deux programmes **(D-PSE)** et **(ECP)** est établie par la propriété suivante [Ahuja *et al.* 1993] : si pour certaines valeurs $\boldsymbol{\mu} \geq 0$, \bar{x} est une solution réalisable pour **(ECP)** telle que $L_{\bar{x}}(\boldsymbol{\mu})$ atteint son optimum et la condition d'écart

$$\sum_{j \in J} \mu_j \left(\mathbb{E}_{\tilde{\xi}} \left[\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij} \right] - C_t \right) = 0$$

est vérifiée, alors $L_{\bar{x}}(\boldsymbol{\mu})$ est la valeur optimale de **(D-PSE)** et \bar{x} est une solution optimale de **(ECP)**. En conséquence, la résolution du problème **(D-PSE)** permet soit d'obtenir une solution optimale du problème **(ECP)** soit une solution approchée.

5.2.3 L'algorithme du sous-gradient

L'approche de résolution du problème dual lagrangien la plus populaire est l'algorithme du sous-gradient [Held *et al.* 1974]. L'algorithme 5 ci-après détaille la méthode du sous-gradient qui est utilisée pour la résolution du problème **(D-PSE)**, où θ_v correspond au pas de l'algorithme. En pratique, θ_v [Fisher 1981, Ahuja *et al.* 1993, Held *et al.* 1974] est fixé comme suit :

- 1 faire $v = 0$ et choisir $\boldsymbol{\mu}^0 \in \mathbb{R}_+^{|J|}$
- 2 trouver $L(\boldsymbol{\mu}^v)$ et une solution \mathbf{x}^v correspondante
- 3 choisir un sous-gradient \mathbf{g}^v de L en $\boldsymbol{\mu}^v$: $g_j^v = \mathbb{E}_{\tilde{\xi}} \left(\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij}^v \right) - C_t, \forall j \in J$
- 4 si $\mathbf{g}^v = 0$, alors $L(\boldsymbol{\mu}^v)$ est la valeur optimale recherchée
- 5 sinon, trouver $\boldsymbol{\mu}^{v+1} = \max\{0, \boldsymbol{\mu}^v + \theta_v \mathbf{g}^v\}$
- 6 faire $v = v + 1$ et aller à l'étape 2

Algorithme 5: Algorithme du sous-gradient

$$\theta_v = \pi_v \cdot \frac{L(\boldsymbol{\mu}^v) - \hat{Z}}{\sum_{i \in J} \left(\mathbb{E}_{\tilde{\xi}} \left(\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij}^v \right) - C_t \right)^2}$$

$0 < \pi_v \leq 2$ et \hat{Z} une borne inférieure de **(ECP)** ou Z , et donc de **(D-PSE)** ou \bar{L} .

Convergence de l'algorithme du sous-gradient

Le résultat fondamental de la convergence de l'algorithme du sous-gradient est que : $L(\boldsymbol{\mu}^v) \rightarrow \bar{L}$ si $\theta_v \rightarrow 0$ et $\sum_{\ell=0}^{\ell=v} \theta_\ell \rightarrow \infty$; $\theta_\ell = (\frac{1}{1+\ell})$ par exemple [Goffin 1977].

En pratique, π_v est déterminé en mettant $\pi_0 = 2$ et divisant par deux la valeur de π_v si au bout d'un certain nombre d'itérations de l'algorithme la valeur $L(\boldsymbol{\mu}^v)$ ne s'améliore pas (ne diminue pas). Cette règle fonctionne plutôt bien empiriquement même s'il s'avère qu'elle ne satisfait pas la condition suffisante de convergence ci-dessus [Fisher 1981]. En général, $\boldsymbol{\mu}^0$ est fixé à $\mathbf{0}$ mais cette valeur peut être améliorée suivant les problèmes traités.

Approximation des espérances mathématiques des charges des postes de travail par la simulation Monte Carlo

Soient $ST_j(\tilde{\xi}) = \sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij}$ la charge d'un poste de travail $j, \forall j \in J$ et la variable aléatoire

$$ST_j^\lambda(\tilde{\xi}) = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{\ell=1}^{\ell=\lambda} ST_j(\tilde{\xi}_\ell), j \in J$$

alors, $ST_j^\lambda(\tilde{\xi})$ est un estimateur sans biais de $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(ST_j(\tilde{\xi}))$, $j \in J$:

$$\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(ST_j^\lambda(\tilde{\xi})) = \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}\left(\frac{1}{\lambda} \sum_{\ell=1}^{\ell=\lambda} ST_j(\tilde{\xi}_\ell)\right) = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{\ell=1}^{\ell=\lambda} \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(ST_j(\tilde{\xi}_\ell)) = \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(ST_j(\tilde{\xi})), j \in J$$

De la loi forte des grands nombres, on a :

$$P\left(\lim_{\lambda \rightarrow +\infty} ST_j^\lambda(\tilde{\xi}) = \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(ST_j(\tilde{\xi})), j \in J\right) = 1$$

signifiant que $ST_j^\lambda(\tilde{\xi}), j \in J$, converge presque sûrement vers l'espérance mathématique $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(ST_j(\tilde{\xi})), j \in J$. En utilisant un λ -échantillon $(\xi_1, \dots, \xi_\lambda)$ du vecteur aléatoire $\tilde{\xi}$, la moyenne $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(ST_j(\tilde{\xi})), j \in J$, est alors approximée par son estimation Monte Carlo

$$ST_j^\lambda = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{\ell=1}^{\ell=\lambda} ST_j(\xi_\ell), j \in J$$

Premières heuristiques utilisées dans l'algorithme du sous gradient

Une borne inférieure \hat{Z} , utilisée dans l'algorithme du sous-gradient, peut être obtenue en appliquant une heuristique au problème (**ECP**). Un exemple simple d'une heuristique est de sélectionner aléatoirement une alternative de désassemblage. Puis, afin de déterminer une affectation faisable des tâches de désassemblage à une séquence de postes de travail, une des heuristiques du problème SALBP-1 comme la technique 'ranked positional weight' [Helgeson & Birnie 1961] peut être appliquée directement au sous-graphe représentant l'alternative de désassemblage sélectionnée.

Concrètement, la borne inférieure \hat{Z} est mise à jour au cours de l'exécution de l'algorithme du sous-gradient de façon à l'améliorer. Pour l'étape $v = 0$, cette borne notée \hat{Z}_0 est obtenue en appliquant l'heuristique simple décrite ci-dessus. Le plus difficile est d'obtenir une borne inférieure \hat{Z}_v pour n'importe quelle étape v de l'algorithme en transformant une solution x^v optimale pour (**L-ECP**) non réalisable pour (**ECP**) en une solution faisable. Une première version d'une telle heuristique est décrite par l'algorithme 6 ci-après où x^v est une solution optimale de (**L-ECP**) et j^* le nombre de postes de travail correspondant.

```

1 faire  $j = 0$  et  $m = j^*$ 
2 tant que  $ST_j^\lambda > C_t$  faire
3   si  $j < m$  alors
4     affecter au poste  $j + 1$  sous contraintes de précédence la tâches  $i, i \in I$ 
5     telle que :  $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(t_i(\tilde{\xi})) \leq \mathbb{E}_{\tilde{\xi}}(t_{i'}(\tilde{\xi}))$ ,  $i \neq i'$ ,  $i' \in I$ ,  $x_{ij}^v = x_{i'j}^v = 1$ 
6   fin si
7   sinon faire
8      $m = m + 1$  et répéter 4 et 5
9   fin sinon
10 fin tant que
11 faire  $j = j + 1$  et aller à la ligne 2

```

Algorithme 6: Heuristique de transformation d'une solution non réalisable issue d'une itération de l'algorithme du sous-gradient en une solution faisable.

Noter que \hat{Z} prend toujours la plus grande valeur parmi celles trouvées à n'importe quelle étape v de l'algorithme du sous-gradient.

5.3 Intégration des problèmes de conception des lignes et de séquençement des tâches de désassemblage

Au niveau de chaque poste de travail d'une ligne de désassemblage opérationnelle, un opérateur exécute les tâches correspondantes de manière séquentielle. Les problèmes

traités dans ce mémoire, jusqu'ici, ne permettent pas de définir l'ordre d'exécution des tâches au niveau de chaque poste, seule leur affectation à ces derniers était déterminée. Afin de définir l'ordre d'exécution des tâches en plus de leur affectation aux postes de travail, les deux problèmes de conception des lignes et séquençement des tâches seront considérés simultanément. L'intégration de ces deux problèmes permet d'éviter les cas de sous-optimalité qui peuvent résulter en les résolvant séparément.

Pour modéliser ces deux problèmes ensemble, une nouvelle variable de décision z_{in} et un nouveau paramètre ρ_{in} sont introduits et sont définis comme suit :

$$z_{in} = \begin{cases} 1 & \text{si la tâche } B_i \text{ est de rang } n ; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

ρ_{in} : 'coût' de réalisation de la tâches $B_i, i \in H$ de rang $n, n \in \mathbb{N} : \rho_{in} = n, \forall i \in I, \forall n \in \mathbb{N}$

Rappelons que H est l'ensemble des indices de toutes les tâches de désassemblage dangereuses. Le programme (**CLS**) ci-dessous, modélise l'intégration des deux problèmes de Conception des Lignes et de Séquençement des tâches de désassemblage.

$$\max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_i} r_l \cdot x_{ij} - \sum_{i \in H} \sum_{n \in \mathbb{N}} \rho_{in} z_{in} - C_t \left(F_c \cdot \sum_{j \in J} j \cdot x_{sj} + C_h \cdot \sum_{j \in J} h_j \right) \right\} \quad (\text{CLS})$$

s.c.

$$\sum_{i \in I} z_{in} \leq 1, \forall n \in \mathbb{N} \quad (5.2)$$

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} z_{in} \leq 1, \forall i \in I \quad (5.3)$$

$$\sum_{i \in S_k} z_{iv} \leq \sum_{i \in P_k} \sum_{n=1}^{v-1} z_{in}, \forall k \in K \setminus \{0\}, \forall v \in \mathbb{N} \setminus \{1\} \quad (5.4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{n \in \mathbb{N}} z_{in} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \quad (5.5)$$

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} n \cdot z_{in} \geq \sum_{j \in J} j \cdot x_{ij}, \forall i \in I \quad (5.6)$$

$$\forall i, i' \in I, i \neq i', \forall j \in J \setminus \{|J|\} : \text{si } (x_{ij} = 1 \wedge x_{i'(j+1)} = 1) \quad (5.7)$$

$$\text{alors } \left(\sum_{n \in \mathbb{N}} n \cdot z_{in} \leq \sum_{n \in \mathbb{N}} n \cdot z_{i'n} \right) \quad (5.8)$$

$$\mathbb{E}_{\tilde{\xi}} \left(\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij} \right) \leq C_t, \forall j \in J \quad (5.1)$$

$$x \in X, z_{in} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall n \in \mathbb{N} \quad (5.9)$$

Les contraintes (5.2) et (5.3) veillent, respectivement, à ce qu'au plus une tâche $i, i \in I$ soit affectée à un rang $n, n \in \mathbb{N}$ et qu'un rang $n, n \in \mathbb{N}$ ne se voit affectée qu'au plus une seule

tâche $i, i \in I$. Les contraintes (5.4) modélisent les relations de précédence entre les tâches I (par rapport aux rangs N). La contrainte (5.5) assure que le nombre de rangs sélectionnés est le même que le nombre de tâches choisies. Les contraintes (5.6) indiquent que pour une tâche donnée i le numéro du rang n auquel elle est affectée est au moins égal au numéro du poste de travail auquel elle est affectée. Les contraintes (5.7) assurent que le rang n d'une tâche i affectée à un poste j soit au plus égal à $n' - 1$ où n' définit le rang d'une tâche i' affectée au poste $j + 1$. Comme précédemment, les contraintes de capacité (5.1) définissent les limitations du temps de cycle où les espérances des charges des postes de travail $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}\left(\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij}\right)$ sont utilisées. L'ensemble (5.2)-(5.1) représente les contraintes du problème de séquençement des tâches et la contrainte $x \in X$ définit celle du problème de conception.

Pour un poste de travail donné $j, j \in J$, la moyenne $\mathbb{E}_{\tilde{\xi}}\left(\sum_{i \in I} t_i(\tilde{\xi}) \cdot x_{ij}\right)$ est approximée par l'estimation Monte Carlo

$$ST_j^\lambda = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{\ell=1}^{\ell=\lambda} ST_j(\xi_\ell), j \in J$$

5.4 Résultats numériques

L'algorithme du sous-gradient pour les problèmes (**L-ECP**) et (**CLS**) a été implémenté sous MS Visual C++ et résolu avec le solveur ILOG CPLEX 12.4 sur une machine Pentium(R) Dual-Core CPU T4500, 2.30 GHz et 3GB RAM. Comme il s'agit de premiers développements de la relaxation lagrangienne et de l'intégration des problèmes de conception et séquençement des tâches, seules les instances de désassemblage ont été considérées. Ces dernières sont les mêmes que celles des chapitres précédents et sont regroupées dans le Tableau 5.1.

TABLE 5.1 – Instances de désassemblage étudiées.

	I	K	L	arcs	relations ET			J	C _t
					0	1	2		
MJKL11	37	22	33	76	4	27	6	10	35
BBD13a	32	14	23	60	4	28	0	4	0.80
L99a	30	18	28	60	2	26	2	9	30
BBD13b	25	11	27	49	4	18	3	4	91
KSE09	23	13	20	47	4	14	5	6	20
L99b	20	13	23	41	5	9	6	9	5.5
BBD13	10	5	12	18	3	6	1	3	0.51

Résultats d'optimisation de la relaxation lagrangienne

Rappelons que si pour certaines valeurs $\mu \geq 0$, \bar{x} est une solution réalisable pour (ECP) telle que $L_{\bar{x}}(\mu)$ atteint son optimum et la condition d'écart est vérifiée, alors $L_{\bar{x}}(\mu)$ est la valeur optimale de (D-PSE) et \bar{x} est une solution optimale de (ECP). Ainsi, pour une solution x réalisable pour (ECP), la relaxation lagrangienne peut permettre de savoir si elle est optimale. Un autre avantage de cette approche est que si l'on ne dispose que de la valeur de $L(\mu)$, il est possible d'évaluer la qualité d'une solution réalisable x . Par exemple, si $\gamma = \frac{L(\mu) - \hat{Z}_x}{\hat{Z}_x} \leq 5\%$ alors la valeur de x est au plus 5% de l'optimum.

En exploitant ces caractéristiques, la recherche d'une solution optimale du problème (ECP) est arrêtée si l'une des conditions suivantes est vérifiée :

1. une solution optimale est retournée
2. la qualité d'une solution retournée $\gamma = \frac{L(\mu) - \hat{Z}}{\hat{Z}} \leq 10\%$
3. le nombre d'itérations $v = 100$

Les résultats obtenus avec la valeur de λ fixé à 1000 sont détaillés dans le Tableau 5.2. L'approche de la relaxation lagrangienne a été efficace pour les instances traitées. Les instances KSE09 et L99b ont été résolues en une seule itération de l'algorithme du sous-gradient due à l'heuristique utilisée pour avoir une borne inférieure.

TABLE 5.2 – Résultats d'optimisation de la relaxation lagrangienne.

	$L(\mu^v)$	meilleur \hat{Z}	meilleur $\gamma\%$	itération v	temps (s)
MJKL11	35.2	32.2	9.3	43	6.31
BBD13a	29.91	27.6	8.37	7	4.14
L99a	478.67	413.0	15.9	100	10.58
BBD13b	250.9	231.2	8.5	15	3.02
KSE09	890	890	0	0	0.95
L99b	71.3	71.3	0	0	0.76
BBD13	84.19	81.42	3.4	3	1.02

Résultats d'optimisation de l'intégration des problèmes de conception et de séquençement des tâches

Les résultats d'optimisation de (CLS) sont regroupés dans le Tableau 5.3 où les colonnes 'obj.', 'tâches-s.', ' n_{postes} ', 'postes-d.' et 'temps(s)' rapportent, respectivement, la valeur optimale de la fonction objectif, le nombre de tâches sélectionnées de l'alternative

de désassemblage choisie, le nombre de postes de travail, le nombre de postes traitant des matières dangereuses et le temps de résolution en secondes.

Afin d'illustrer l'intégration des problèmes de conception et de séquençement des tâches, la solution optimale de l'instance L99b est détaillée dans la Figure 5.1. Cette dernière illustre l'alternative de désassemblage choisie, l'ordre de réalisation des tâches correspondant ainsi que leur affectation aux postes de travail.

Comme montré dans la Figure 5.1, pour concevoir une ligne de profit maximum, le produit doit être désassemblé partiellement. En effet, les tâches B_{17} , B_{18} et B_{19} appartiennent à l'alternative choisie mais ne sont pas sélectionnées. Les 4 tâches dangereuses sont affectées aux deux premiers postes de travail. Le programme (CLS) par le terme $\sum_{i \in H} \sum_{n \in N} \rho_{in} z_{in}$ force l'affectation des tâches dangereuses aux premiers postes de la ligne afin de limiter l'impact des matières dangereuses sur la ligne et ainsi éviter des coûts supplémentaires.

TABLE 5.3 – Résultats d'optimisation de l'intégration des problèmes de conception et de séquençement des tâches de désassemblage.

	obj.	tâches-s	npostes	postes-d.	temps(s)
MJKL11	35	3	2	1	2.95
BBD13a	177.6	2	2	1	0.70
L99a	438	7	4	0	2.73
BBD13b	87	4	2	0	0.47
KSE09	897	4	2	1	0.70
L99b	43.5	6	3	2	0.87
BBD13	88.9	3	2	1	0.09

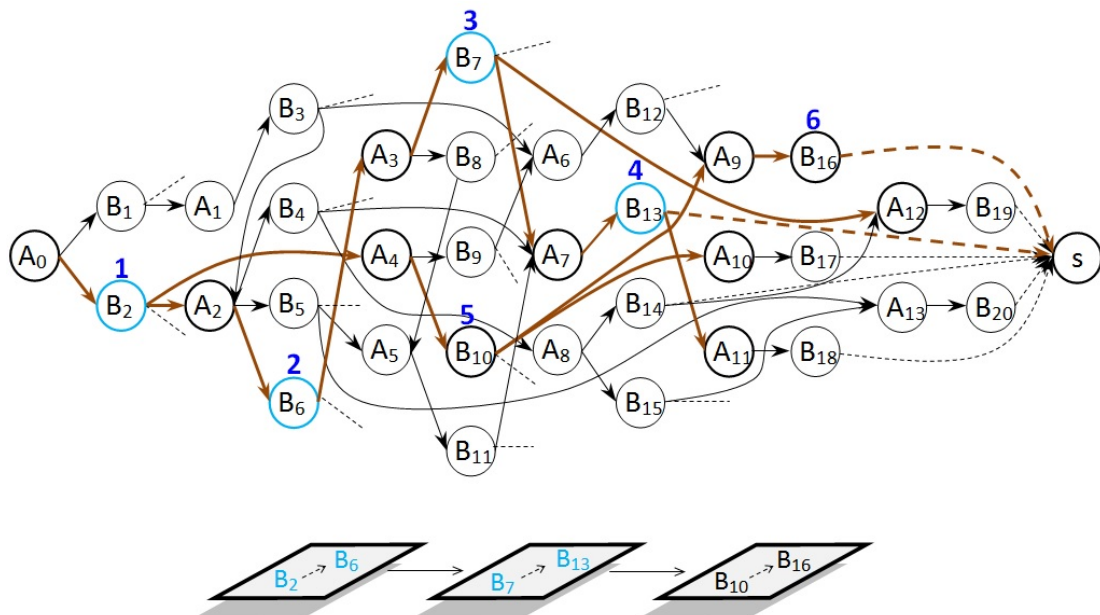


FIGURE 5.1 – L'alternative de désassemblage optimale de l'instance L99b, l'ordre de réalisation des tâches correspondant ainsi que leur affectation aux postes de travail.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une première version de la relaxation lagrangienne est proposée pour la résolution efficace du problème de conception des lignes de désassemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches. Ces dernières sont prises pour des variables aléatoires indépendantes avec des lois de probabilité quelconques mais connues. Les moyennes des charges des postes de travail ont été considérées.

L'objectif était la maximisation du profit de la ligne à concevoir sous désassemblage partiel et en présence de matières dangereuses. La relaxation lagrangienne, dans notre cas, présente deux avantages majeurs :

1) elle peut retourner une solution optimale et 2) si uniquement la valeur optimale du problème lagrangien est connue, elle permet d'évaluer la qualité d'une solution réalisable donnée. En plus de ces deux avantages, la procédure de la relaxation lagrangienne peut être intégrée avec l'algorithme L-shaped du chapitre 3 afin de résoudre en un temps réduit les problèmes linéaires entiers de sa première étape.

Une deuxième formulation intégrant les problèmes de conception des lignes et celui de séquençement des tâches de désassemblage a été également proposée. L'objectif était de maximiser le profit de la ligne. Cette modélisation permet de fixer l'ordre de réalisation des tâches en plus de leur affectation aux postes de travail.

Les problèmes lagrangiens ont été résolus avec l'algorithme du sous-gradient. Cet algorithme utilise une heuristique développée afin de transformer les solutions optimales des problèmes lagrangiens mais non réalisables en des solutions faisables pour le problème étudié. La relaxation lagrangienne et le problème intégrant la conception des lignes et le séquençement des tâches ont été évalués en utilisant un ensemble de 7 instances de la littérature de désassemblage. Pour le premier problème, deux instances ont été résolues à l'optimum et 4 sont à moins de 10% de l'optimum. Pour le second, toutes les instances ont été résolues à l'optimalité.

Conclusion générale

Dans ce manuscrit, nous avons présenté une étude qui se focalise sur la prise en compte des incertitudes lors de la conception des lignes de désassemblage. En effet, une ligne de désassemblage présente un niveau élevé d'incertitudes qui sont liées aux structures, quantités et qualité des produits en fin de vie. Ces différentes sources se traduisent notamment par des variabilités importantes des durées opératoires des tâches. Afin d'apporter aux décideurs une aide à l'étape de conception d'une ligne de désassemblage, et permettre aux industriels de tirer les avantages économiques qu'offre l'utilisation d'une telle ligne, nous avons développé, dans ce mémoire, des modélisations et des approches de résolution efficaces permettant la conception efficace d'une ligne de désassemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches.

Notre but étant la proposition d'approches adaptées à la prise en compte d'incertitudes dans un contexte de désassemblage, nous avons commencé, dans le chapitre 1, par l'étude des particularités du problème de conception des lignes de désassemblage. Dans le chapitre 2, nous avons présenté les travaux existants dans la littérature traitant les incertitudes des durées opératoires des tâches lors de la conception des lignes de production. Cette étude nous a permis de constater un manque de méthodes capables de fournir au concepteur de lignes de désassemblage des informations concernant la qualité des solutions obtenues. Le développement de telles méthodes était le but des travaux présentés dans les chapitres 3, 4 et 5.

Dans le chapitre 3, nous avons considéré le problème de conception des lignes de désassemblage, minimisant leurs arrêts, ainsi que celui d'équilibrage des charges des postes de travail des lignes conçues. Nous avons pu intégrer les cas de désassemblage partiel et présence de matières dangereuses. Les durées opératoires des tâches ont été prises pour des variables aléatoires indépendantes avec des lois de probabilité connues. Pour résoudre efficacement le premier problème, nous avons proposé un programme stochastique en deux étapes (stages) avec recours fixe et une approche de résolution d'approximation moyenne par échantillonnage. Cette méthode de résolution intègre la décomposition de Benders et la simulation Monte Carlo. Elle permet d'obtenir des bornes inférieures et supérieures des valeurs optimales des problèmes résolus ainsi que des intervalles de confiance associés de niveau prédéterminé. Les écarts d'optimalité et leurs variances sont également fournis.

Pour le deuxième problème, nous avons proposé un programme stochastique et une borne supérieure de la valeur optimale de ce dernier.

L'approche de résolution d'approximation moyenne par échantillonnage proposée pour concevoir une ligne de désassemblage sous incertitudes possède des caractéristiques intéressantes. Cette méthode est capable de considérer n'importe quelles distributions de probabilité connues pour les durées opératoires des tâches et même différentes d'une tâche à l'autre. D'autres sources d'incertitudes comme celles du temps de cycle peuvent facilement être prises en compte. Enfin, la résolution des programmes principaux ainsi que les sous-problèmes correspondants peut être réalisée en parallèle pour réduire le temps de calcul.

Pour montrer la validité de cette approche dans le cas d'assemblage, les modélisations et méthodes de résolution proposées ont été adaptées et appliquées aux problèmes de conception et équilibrage des lignes d'assemblage. Différentes instances de la littérature de taille industrielle ont été résolues et les résultats obtenus, comme pour le cas de désassemblage, sont satisfaisants.

Dans le chapitre 4, les problèmes de conception des lignes de désassemblage, garantissant un niveau de service donné, et l'équilibrage des lignes de désassemblage conçues sont étudiés. Les durées des tâches sont prises pour des variables aléatoires mutuellement indépendantes avec des lois normales connues. La méthode de résolution comporte comme dans le chapitre 3 deux phases. Dans la première, un programme binaire en 0-1 avec contraintes conjointement probabilisées, une borne supérieure et quatre bornes inférieures ont été proposés pour la conception efficace des lignes de désassemblage. Le calcul des bornes était basé sur la programmation conique de second ordre et l'approximation, convexe linéaire par morceaux, de fonctions. Dans la deuxième phase, un autre programme stochastique binaire en 0-1 était à résoudre pour équilibrer les charges des postes de travail.

Les modèles développés ont été évalués en utilisant un ensemble d'instances de la littérature. Les résultats obtenus ont montré que les bornes inférieures et supérieure proposées étaient efficaces pour résoudre de manière optimale les problèmes de conception des lignes de désassemblage et d'assemblage sous contraintes de temps de cycle conjointement probabilisées.

Dans le chapitre 5, afin de résoudre efficacement le problème de conception des lignes de désassemblage où sont considérées les moyennes des charges des postes de travail, une première version de la relaxation lagrangienne a été proposée. Les durées opératoires des tâches sont prises pour des variables aléatoires indépendantes avec des lois de probabilité quelconques mais connues. La relaxation lagrangienne, dans notre cas d'étude, présente deux avantages importants pour les décideurs : elle peut fournir une solution optimale du problème traité et si uniquement les valeurs optimales des problèmes lagrangiens sont obtenues, elle permet d'évaluer la qualité des solutions réalisables connues. De plus, cette

procédure peut être utilisée au niveau de la première étape de l'algorithme L-shaped afin de résoudre en un temps réduit les problèmes principaux.

Une deuxième formulation intégrant le problème de configuration et de séquençement des tâches pour une ligne de désassemblage était proposée. La détermination de l'ordre de réalisation des tâches en plus de leur affectation aux postes de travail permet dans la pratique de respecter la contrainte législative sur l'élimination des matières dangereuses en premier lieu. L'algorithme de branchement et coupe du solveur Cplex a été utilisé pour résoudre des instances de la littérature. Les résultats d'optimisation étaient satisfaisants.

Les travaux réalisés ouvrent plusieurs voies à des recherches futures portant à la fois sur la complexification des modèles utilisés que sur le développement d'approches plus efficaces notamment grâce à la parallélisation des calculs déjà évoquée. En particulier, il sera intéressant d'étudier les techniques d'optimisation dans les graphes afin de résoudre le problème d'affectation des tâches de désassemblage. En effet, le graphe de précedence est orienté sans cycle, bi-parti et les arcs sont de deux types différents. Par conséquent, les techniques de coloration de graphes, d'affectation dans les graphes bi-partis et les problèmes de flot peuvent être exploitées. Il sera également intéressant de considérer le cas où les produits seraient de types multiples et où leurs états en fin de vie seraient différents. Enfin, la prise en compte des défaillances des tâches de désassemblage sera également une piste intéressante à développer.

Liste des travaux réalisés

Articles dans des revues

- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, S. Jack Hu, *Dealing with uncertainty in disassembly line design*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 63, Issue 1, 2014, Pages 21-24.
- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *A sample average approximation method for disassembly line balancing problem under uncertainty*, Computers & Operations Research, Volume 51, 2014, Pages 111-122.
- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *An exact solution approach for disassembly line balancing problem under uncertainty of the task processing times*, International Journal of Production Research, online, DOI: [10.1080/00207543.2014.961212](https://doi.org/10.1080/00207543.2014.961212).
- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, Robert Riggs, S. Jack Hu, *Bender's decomposition and monte carlo sampling for stochastic profit oriented partial disassembly line design and balancing*, Naval Research Logistics, under revision.
- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, S. Jack Hu, *Second order conic approximation for disassembly line design with joint probabilistic constraints*, European Journal of Operational Research, under review.

Chapitres de livres

- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *Chance constrained programming model for stochastic profit-oriented disassembly line balancing in the presence of hazardous parts*, Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains, Prabhu, V., Taisch, M., and Kiritsis, D. (eds), Springer Series : IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 414, 103-110, 2013, State College, PA, USA : Springer.

- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *A stochastic formulation of the disassembly line balancing problem*, Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services, Emmanouilidis, C., Taisch, M., and Kiritsis, D. (eds), Springer Series : IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 397, 397-404, 2013, Rhodes, Greece : Springer.

Articles dans les actes de conférences avec comité de relecture

- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *Disassembly line balancing and sequencing under uncertainty*, Procedia CIRP, Volume 15, 2014, Pages 239-244.
- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *Lagrangian relaxation for stochastic disassembly line balancing problem*, Procedia CIRP, Volume 17, 2014, Pages 56-60.
- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *Disassembly line balancing problem with fixed number of workstations under uncertainty*, Proceedings of the 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, August 24-29, 2014, 3522-3526.
- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *A cone programming approach for stochastic disassembly line balancing in the presence of hazardous parts*, Proceedings of the 22nd International Conference on Production Research (ICPR 22), Iguassu Falls, Brazil, July 28 - August 1, 2013.
- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *L-shaped algorithm for stochastic disassembly line balancing problem*, Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, Saint Petersburg, Russia, June 19-21, 2013, 407-411.
- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *A decomposition method for stochastic partial disassembly line balancing with profit maximization*, Proceedings of 9th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE'2013), August 17-21, 2013, Madison, WI, USA, 410-415.

Communications à des conférences avec un résumé

- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *A sample average approximation method for disassembly line design under uncertainty*, European Conference on Stochastic Programming and Energy Applications, 1st EURO Mini Conference, Paris, France, September 24-26, 2014.

-
- M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *Relaxation lagrangienne pour le problème de conception de lignes de désassemblage sous incertitudes*, 15^{ème} congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROA-DEF 2014), Bordeaux, 26-28 Février, 2014.
 - M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *Équilibrage des lignes de désassemblage sous incertitude en présence de composants polluants*, 14^{ème} congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROA-DEF 2013), Troyes, 13-15 Février, 2013.
 - M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *A stochastic formulation of the disassembly line balancing problem*, Proceedings of the 7th International conference on IT in Industry (ITI 2012), Minsk, Belarus, October 30-31, 2012, p. 29-30.
 - M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud, *A stochastic formulation of the disassembly line balancing problem*, 25th Conference on Operational Research (EURO2012), Vilnius, Lithuania, July 8-11, 2012, p. 131.
 - M. Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, *Une approche stochastique pour la résolution du problème d'équilibrage des lignes de désassemblage sous incertitude*, 17^{èmes} Journées STP du GdR MACS, Clermont-Ferrand, 6 décembre, 2012.

Bibliographie

- [Adenso-Diaz *et al.* 2008] B. Adenso-Diaz, S. Garcia-Carbajal et S.M. Gupta. *A path-relinking approach for a bi-criteria disassembly sequencing problem*. Computers & Operations Research, vol. 35, pages 3989–3997, 2008. (Cité en page [16](#).)
- [Adil & Ghosh 1999] Gajendra K. Adil et Jay B. Ghosh. *Analysis of Lagrangian Lower Bounds for a Graph Partitioning Problem*. Operations Research, vol. 47, no. 5, pages 785–788, 1999. (Cité en page [90](#).)
- [Agrawal & Tiwari 2006] S. Agrawal et M. K. Tiwari. *A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem*. International Journal of Production Research, vol. 46, no. 6, pages 1405–1429, 2006. (Cité en page [31](#).)
- [Agrawal *et al.* 2013] D. Agrawal, P. T. Nallamothu, S. R. Mandala, S. Kumara et D. A. Finke. *Automated disassembly sequence planning and optimization*. In Industrial and Systems Engineering Research Conference, pages 122–131, 2013. (Cité en page [16](#).)
- [Ahmed & Shapiro 2002] Shabbir Ahmed et Alexander Shapiro. *The Sample Average Approximation Method for Stochastic Programs with Integer Recourse*. SIAM Journal of Optimization, vol. 12, pages 479–502, 2002. (Cité en page [41](#).)
- [Ahn *et al.* 2011] H. . Ahn, D. . Lee et H. . Kim. *Solution algorithms for dynamic lot-sizing in remanufacturing systems*. International Journal of Production Research, vol. 49, no. 22, pages 6729–6748, 2011. (Cité en page [14](#).)
- [Ahuja *et al.* 1993] Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti et James B. Orlin. *Network flows : Theory, algorithms, and applications*. Prentice Hall, 1993. (Cité en page [92](#).)
- [Aleotti & Caselli 2011] J. Aleotti et S. Caselli. *Physics-based virtual reality for task learning and intelligent disassembly planning*. Virtual Reality, vol. 15, no. 1, pages 41–54, 2011. (Cité en page [16](#).)
- [Alizadeh & Goldfarb 2003] F. Alizadeh et D. Goldfarb. *Second-order cone programming*. Mathematical Programming, vol. 95, no. 1, pages 3–51, 2003. (Cité en page [75](#).)

- [Altekin & Akkan 2011] F. Tevhide Altekin et Can Akkan. *Task-failure-driven rebalancing of disassembly lines*. International Journal of Production Research, vol. 50, no. 18, pages 4955–4976, 2011. (Cité en page 18.)
- [Altekin et al. 2008] F. Tevhide Altekin, Levent Kandiller et Nur Evin Ozdemirel. *Profit-oriented disassembly-line balancing*. International Journal of Production Research, vol. 46, no. 10, pages 2675–2693, 2008. (Cité en page 18.)
- [Altekin 2005] Fatma Tevhide Altekin. *Profit oriented disassembly line balancing*. PhD thesis, Middle East Technical University, 2005. (Cité en page 9.)
- [Ashby 2012] Michael F. Ashby. *Materials and the environment, eco-informed material choice*. Butterworth-Heinemann, 2 édition, 2012. (Cité en page 7.)
- [Ağpak & Gökçen 2007] Kürşad Ağpak et Hadi Gökçen. *A chance-constrained approach to stochastic line balancing problem*. European Journal of Operational Research, vol. 180, pages 1098–1115, 2007. (Cité en page 30.)
- [Avikal et al. 2013] Shwetank Avikal, Rajeev Jain et P.K. Mishra. *A Heuristic for U-Shaped Disassembly Line Balancing Problems*. MIT International Journal of Mechanical Engineering, vol. 3, no. 1, pages 51–56, 2013. (Cité en page 17.)
- [Avikal et al. 2014] S. Avikal, P. K. Mishra et R. Jain. *A Fuzzy AHP and PROMETHEE method-based heuristic for disassembly line balancing problems*. International Journal of Production Research, vol. 52, no. 5, pages 1306–1317, 2014. (Cité en page 17.)
- [Aydemir-Karadag & Turkbey 2013] Ayyuce Aydemir-Karadag et Orhan Turkbey. *Multi-objective optimization of stochastic disassembly line balancing with station parallelizing*. Computers & Industrial Engineering, vol. 65, no. 3, pages 413–425, 2013. (Cité en page 31.)
- [Azab et al. 2011] A. Azab, A. Ziout et W. ElMaraghy. *Modeling and optimization for disassembly planning*. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, vol. 5, no. 1, pages 1–8, 2011. (Cité en page 14.)
- [Bagher et al. 2011] M. Bagher, M. Zandieh et H. Farsijani. *Balancing of stochastic U-type assembly lines : an imperialist competitive algorithm*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 54, no. 1–4, pages 271–285, 2011. (Cité en page 30.)
- [Bailey et al. 1999] T. Glenn Bailey, Paul A. Jensen et David P. Morton. *Response surface analysis of two-stage stochastic linear programming with recourse*. Naval Research Logistics (NRL), vol. 46, no. 7, pages 753–776, 1999. (Cité en page 41.)
- [Balas & Christofides 1981] Egon Balas et Nicos Christofides. *A restricted Lagrangean approach to the traveling salesman problem*. Mathematical Programming, vol. 21, pages 19–46, 1981. (Cité en page 90.)

- [Barba-Gutiérrez & Adenso-Díaz 2009] Y. Barba-Gutiérrez et B. Adenso-Díaz. *Reverse MRP under uncertain and imprecise demand*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 40, no. 3-4, pages 413–424, 2009. (Cité en page 14.)
- [Barba-Gutierrez et al. 2008] Y. Barba-Gutierrez, B. Adenso-Diaz et S.M. Gupta. *Lot sizing in reverse MRP for scheduling disassembly*. International Journal of Production Economics, vol. 111, pages 741–751, 2008. (Cité en page 14.)
- [Baybars 1986] Ilker Baybars. *A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem*. Management Science, vol. 32, no. 8, pages 909–932, 1986. (Cité en page 40.)
- [Baykasoğlu & Özbakır 2007] Adil Baykasoğlu et Lale Özbakır. *Stochastic U-line balancing using genetic algorithms*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 32, pages 139–147, 2007. (Cité en page 30.)
- [Becker & Scholl 2006] Christian Becker et Armin Scholl. *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*. European Journal of Operational Research, vol. 168, no. 3, pages 694 – 715, 2006. (Cité en page 40.)
- [Behdad & Thurston 2012] S. Behdad et D. Thurston. *Disassembly and reassembly sequence planning tradeoffs under uncertainty for product maintenance*. Journal of Mechanical Design, Transactions Of the ASME, vol. 134, no. 4, 2012. (Cité en page 16.)
- [Behdad et al. 2012] S. Behdad, L. P. Berg, D. Thurston et J. Vance. *Integrating immersive computing technology with mixed-integer nonlinear programming for disassembly sequence planning under uncertainty*. In Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, volume 3, pages 1143–1151, 2012. (Cité en page 16.)
- [Behdad et al. 2014] S. Behdad, L. Berg, J. Vance et D. Thurston. *Immersive computing technology to investigate tradeoffs under uncertainty in disassembly sequence planning*. Journal of Mechanical Design, Transactions Of the ASME, vol. 136, no. 7, 2014. (Cité en page 16.)
- [Bentaha et al. 2013a] Mohand Lounes Bentaha, Olga Battaïa et Alexandre Dolgui. *Chance Constrained Programming Model for Stochastic Profit-Oriented Disassembly Line Balancing in the Presence of Hazardous Parts*. In Vittal Prabhu, Marco Taisch et Dimitris Kiritsis, éditeurs, Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains, volume 414 of *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pages 103–110. Springer Berlin Heidelberg, State College, PA, USA, 2013. (Cité en page 56.)
- [Bentaha et al. 2013b] Mohand Lounes Bentaha, Olga Battaïa et Alexandre Dolgui. *A Stochastic Formulation of the Disassembly Line Balancing Problem*. In Christos

- Emmanouilidis, Marco Taisch et Dimitris Kiritsis, éditeurs, *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services*, volume 397 of *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pages 397–404. Springer Berlin Heidelberg, Rhodes, Greece, 2013. (Cité en page 56.)
- [Betts & Mahmoud 1989] J. Betts et K. I. Mahmoud. *Identifying multiple solutions for assembly line balancing having stochastic task times*. *Computers and Engineering*, vol. 16, no. 3, pages 427–445, 1989. (Cité en page 29.)
- [Birge & Louveaux 1997] John R. Birge et François Louveaux. *Introduction to stochastic programming*. Springer-Verlag New York Inc., 1997. (Cité en page 41.)
- [Birge 1997] John R. Birge. *Stochastic programming computation and applications*. *INFORMS Journal on Computing*, vol. 9, no. 2, pages 111–133, 1997. (Cité en page 43.)
- [Blackmore *et al.* 2011] L. Blackmore, M. Ono et B.C. Williams. *Chance-constrained optimal path planning with obstacles*. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 6, pages 1080–1094, 2011. (Cité en page 77.)
- [Boyd & Vandenberghe 2004] Stephen Boyd et Lieven Vandenberghe. *Convex optimization*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2004. (Cité en page 75.)
- [Branda 2012] M. Branda. *Chance constrained problems : Penalty reformulation and performance of sample approximation technique*. *Kybernetika*, vol. 48, no. 1, pages 105–122, 2012. (Cité en page 77.)
- [Brander & Forsberg 2005] P. Brander et R. Forsberg. *Cyclic lot scheduling with sequence-dependent setups : a heuristic for disassembly processes*. *International Journal of Production Research*, vol. 43, pages 295–310, 2005. (Cité en page 14.)
- [Brennan *et al.* 1994] L. Brennan, S.M. Gupta et K.N. Taleb. *Operations planning issues in an assembly/disassembly environment*. *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 14, no. 9, pages 57–67, 1994. (Cité en pages 1 et 11.)
- [Brito & Dekker 2003] MarisaP. Brito et Rommert Dekker. *A Framework for Reverse Logistics*. In Rommert Dekker, Moritz Fleischmann, Karl Inderfurth et LukN. Wassenhove, éditeurs, *Reverse Logistics*, pages 3–27. Springer Berlin Heidelberg, 2003. (Cité en page 1.)
- [Cakir *et al.* 2011] Burcin Cakir, Fulya Altiparmak et Berna Dengiz. *Multi-objective optimization of a stochastic assembly line balancing : A hybrid simulated annealing algorithm*. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 60, no. 3, pages 376 – 384, 2011. (Cité en page 29.)

- [Carter & Silverman 1984] John C. Carter et Fred N. Silverman. *A cost-effective approach to stochastic line balancing with off-line repairs*. Journal of Operations Management, vol. 4, no. 2, pages 145–157, 1984. (Cité en page 29.)
- [Chakravarty & Shtub 1986] Amiya K. Chakravarty et Avraham Shtub. *A cost minimization procedure for mixed model production lines with normally distributed task times*. European Journal of Operational Research, vol. 23, no. 1, pages 25 – 36, 1986. (Cité en page 29.)
- [Che et al. 2011] Jia Che, Jeong-soo Yu et Roy Serrona Kevin. *End-of-life vehicle recycling and international cooperation between Japan, China and Korea : Present and future scenario analysis*. Journal of Environmental Sciences, vol. 23, no. Supplement, pages S162–S166, 2011. (Cité en page 6.)
- [Chen & Abrishami 2014] M. Chen et P. Abrishami. *A mathematical model for production planning in hybrid manufacturing- remanufacturing systems*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 71, no. 5-8, pages 1187–1196, 2014. (Cité en page 14.)
- [Chen & Gao 2009] W. Chen et N. Gao. *Optimization methods for disassembly scheduling problems with capacity constraints in remanufacturing system*. Dongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Southeast University (Natural Science Edition), vol. 39, no. 5, pages 1081–1086, 2009. (Cité en page 14.)
- [Chen & Zhang 2009] Ming Chen et Fan Zhang. *End-of-Life vehicle recovery in china : Consideration and innovation following the EU ELV directive*. Journal Of the Minerals, vol. 61, no. 3, pages 45–52, 2009. (Cité en page 6.)
- [Chen et al. 2010] W. Chen, S. Huang et N. Gao. *Study on genetic algorithms approach applied to the capacitated disassembly scheduling problem*. In Proceedings of the International Conference on E-Business and E-Government, ICEE 2010, pages 4581–4585, 2010. (Cité en page 14.)
- [Chen et al. 2012] JiaZhao Chen, YuXiang Zhang et HaiTao Liao. *Disassembly Sequence Planning Based on Improved Genetic Algorithm*. In David Jin et Sally Lin, éditeurs, Advances in Multimedia, Software Engineering and Computing Vol.2, volume 129 of *Advances in Intelligent and Soft Computing*, pages 471–476. Springer Berlin Heidelberg, 2012. (Cité en page 16.)
- [Chen 2005] Ming Chen. *End-of-life vehicle recycling in China : Now and the future*. Journal Of the Minerals, vol. 57, no. 10, pages 20–26, 2005. (Cité en page 6.)
- [Cheng & Lisser 2012] Jianqiang Cheng et Abdel Lisser. *A second-order cone programming approach for linear programs with joint probabilistic constraints*. Operations Research Letters, vol. 40, no. 5, pages 325 – 328, 2012. (Cité en pages 75, 77, 78 et 79.)

- [Chiang & Urban 2006] Wen-Chyuan Chiang et Timothy L. Urban. *The stochastic U-line balancing problem : a heuristic procedure*. European Journal of Operational Research, vol. 175, pages 1767–1781, 2006. (Cité en page 30.)
- [Chica *et al.* 2013] Manuel Chica, Óscar Cordon, Sergio Damas et Joaquín Bautista. *A robustness information and visualization model for time and space assembly line balancing under uncertain demand*. International Journal of Production Economics, vol. 145, no. 2, pages 761 – 772, 2013. (Cité en page 18.)
- [Chung & Peng 2006] C. Chung et Q. Peng. *Evolutionary sequence planning for selective disassembly in de-manufacturing*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 19, pages 278–286, 2006. (Cité en page 16.)
- [Commission 2000] European Commission. *directive 2000/53/EC of the European Parliament on end of life vehicles*, 2000. (Cité en page 5.)
- [De Wolf 2003] Daniel De Wolf. *Gestion de la Production*. Université Charles De Gaulle - Lille III, UFR de Mathématiques, Sciences Economiques et Sociales, Février 2003. (Cité en page 13.)
- [DeGroot & Schervish 2012] M.H. DeGroot et M.J. Schervish. Probability and statistics. Addison–Wesley, 4 édition, 2012. (Cité en page 45.)
- [Dempsey *et al.* 2010] P. G. Dempsey, S. E. Mathiassen, J. A. Jackson et N. V. O’Brien. *Influence of three principles of pacing on the temporal organisation of work during cyclic assembly and disassembly tasks*. Ergonomics, vol. 53, no. 11, pages 1347–1358, 2010. (Cité en page 19.)
- [DePaolo & Rader Jr. 2007] Concetta A. DePaolo et David J. Rader Jr. *A heuristic algorithm for a chance constrained stochastic program*. European Journal of Operational Research, vol. 176, no. 1, pages 27 – 45, 2007. (Cité en page 77.)
- [Desrosiers *et al.* 1988] Jacques Desrosiers, Michel Sauvé et François Soumis. *Lagrangian Relaxation Methods for Solving the Minimum Fleet Size Multiple Traveling Salesman Problem with Time Windows*. Management Science, vol. 34, no. 8, pages 1005–1022, 1988. (Cité en page 90.)
- [Ding *et al.* 2009] L. . Ding, J. . Tan, Y. . Feng et Y. . Gao. *Multiobjective optimization for disassembly line balancing based on Pareto ant colony algorithm*. Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS, vol. 15, no. 7, pages 1406–1413+1429, 2009. (Cité en page 17.)
- [Ding *et al.* 2010a] Li-Ping Ding, Yi-Xiong Feng, Jian-Rong Tan et Yi-Cong Gao. *Multi-objective disassembly line balancing via modified ant colony optimization algorithm*. In Bio-Inspired Computing : Theories and Applications (BIC–TA), 2010 IEEE Fifth International Conference, pages 426–430, 2010. (Cité en page 17.)

- [Ding *et al.* 2010b] Li-Ping Ding, Yi-Xiong Feng, Jian-Rong Tan et Yi-Cong Gao. *A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 48, no. 5–8, pages 761–771, 2010. (Cité en page 17.)
- [Doh & Lee 2010] H. . Doh et D. . Lee. *Generic production planning model for remanufacturing systems*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture, vol. 224, no. 1, pages 159–168, 2010. (Cité en page 14.)
- [Dolgui & Kovalev 2012] Alexandre Dolgui et Sergey Kovalev. *Scenario based robust line balancing : Computational complexity*. Discrete Applied Mathematics, vol. 160, no. 13-14, pages 1955 – 1963, 2012. (Cité en page 30.)
- [Dong & Arndt 2003] J. Dong et G. Arndt. *A review of current research on disassembly sequence generation and computer aided design for disassembly*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Engineering Manufacture ., vol. 217, pages 299–312, 2003. (Cité en page 16.)
- [Dong & Zhang 2013] B. Dong et R. Zhang. *Disassembly sequence planning based on synchronous net*. In Proceedings - 6th International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2013, volume 2, pages 297–300, 2013. (Cité en page 16.)
- [Duta *et al.* 2005] L. Duta, F. Gh. Filip et J. M. Henrioud. *Applying equal piles approach to disassembly line balancing problem*. In Proceedings of the 16th IFAC World Congress, pages 1449–1449, 2005. (Cité en page 17.)
- [Duta *et al.* 2008] L. Duta, F. G. Filip et I. Caciula. *Real Time Balancing of Complex Disassembly Lines*. In Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control, pages 913–918, 2008. (Cité en page 17.)
- [El Sayed *et al.* 2011] A. El Sayed, E. Kongar, S. M. Gupta et T. Sobh. *An online genetic algorithm for automated disassembly sequence generation*. In Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, volume 3, pages 657–664, 2011. (Cité en page 16.)
- [Erdos *et al.* 2001] G. Erdos, T. Kis et P. Xirouchakis. *Modelling and evaluating product end-of-life options*. International Journal of Production Research, vol. 39, pages 1203–1220, 2001. (Cité en page 16.)
- [Erel *et al.* 2005] E. Erel, I. Sabuncuoglu et H. Sekerci. *Stochastic assembly line balancing using beam search*. International Journal of Production Research, vol. 43, no. 7, pages 1411–1426, 2005. (Cité en page 29.)
- [Fang *et al.* 2010] X. Fang, Q. Hua et Z. Feng. *Disassembly sequence planning based on ant colony optimization algorithm*. In Proceedings 2010 IEEE 5th International

- Conference on Bio-Inspired Computing : Theories and Applications, BIC-TA 2010, pages 1125–1129, 2010. (Cité en page 16.)
- [Fazlollahtabar *et al.* 2011] Hamed Fazlollahtabar, Hamed Hajmohammadi et Alireza Es'haghzadeh. *A heuristic methodology for assembly line balancing considering stochastic time and validity testing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 52, no. 1-4, pages 311–320, 2011. (Cité en page 29.)
- [Filipescu *et al.* 2012] A. Filipescu, S. Filipescu et E. Minca. *Hybrid system control of an assembly/disassembly mechatronic line using robotic manipulator mounted on mobile platform*. In Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012 7th IEEE Conference on, pages 447–452, July 2012. (Cité en page 19.)
- [Finch 2008] Byron J. Finch. Operations now. Tata McGraw-Hill Education Pvt. Ltd., 3 édition, 2008. (Cité en page 22.)
- [Fisher 1981] Marshall L. Fisher. *The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems*. Management Science, vol. 27, no. 1, pages 1–18, 1981. (Cité en pages 91, 92 et 93.)
- [Galambos 1977] Janos Galambos. *Bonferroni Inequalities*. The Annals of Probability, vol. 5, no. 4, pages 577–581, 1977. (Cité en page 78.)
- [Gamberini *et al.* 2006] Rita Gamberini, Andrea Grassi et Bianca Rimini. *A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem*. International Journal of Production Economics, vol. 102, no. 2, pages 226 – 243, 2006. (Cité en page 30.)
- [Gamberini *et al.* 2009] R. Gamberini, E. Gebennini, A. Grassi et A. Regattieri. *A multiple single-pass heuristic algorithm solving the stochastic assembly line rebalancing problem*. International Journal of Production Research, vol. 47, no. 8, pages 2141–2164, 2009. (Cité en page 30.)
- [Gao *et al.* 2004] M. Gao, M.C. Zhou et Y. Tang. *Intelligent decision making in disassembly process based on fuzzy reasoning Petri nets*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, vol. 34, pages 2029–2034, 2004. (Cité en page 16.)
- [Gao *et al.* 2012] KaizhouZ. Gao, PonnuthuraiNagaratnam Suganthan et TayJin Chua. *Discrete Harmony Search Algorithm for Dynamic FJSSP in Remanufacturing Engineering*. In BijayaKetan Panigrahi, Swagatam Das, PonnuthuraiNagaratnam Suganthan et PradiptaKumar Nanda, éditeurs, Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing, volume 7677 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 9–16. Springer Berlin Heidelberg, 2012. (Cité en page 14.)

- [Gesing 2004] Adam Gesing. *Assuring the continued recycling of light metals in end-of-life vehicles : A global perspective*. Journal Of the Minerals, vol. 56, no. 8, pages 18–27, 2004. (Cité en page 6.)
- [Giudice & Fargione 2007] F. Giudice et G. Fargione. *Disassembly planning of mechanical systems for service and recovery : a genetic algorithms based approach*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 18, pages 313–329, 2007. (Cité en page 16.)
- [Go et al. 2012] T. F. Go, D. A. Wahab, M. N. A. Rahman, R. Ramli et A. Hussain. *Genetically optimised disassembly sequence for automotive component reuse*. Expert Systems with Applications, vol. 39, no. 5, pages 5409–5417, 2012. (Cité en page 16.)
- [Godichaud et al. 2009] M. Godichaud, F. Pères et A. Tchangani. *Disassembly process planning using bayesian networks*. In Engineering Asset Lifecycle Management - Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management, WCEAM 2009, pages 280–287, 2009. (Cité en page 14.)
- [Godichaud et al. 2010] M. Godichaud, F. Pères et A. Tchangani. *Model and optimization for end-of-life disassemble strategy with uncertainties*. Journal Européen des Systemes Automatisés, vol. 44, no. 8, pages 941–974, 2010. (Cité en page 14.)
- [Goffin 1977] J.L. Goffin. *On convergence rates of subgradient optimization methods*. Mathematical Programming, vol. 13, no. 1, pages 329–347, 1977. (Cité en page 93.)
- [Gonzalez & Adenso-Diaz 2006] B. Gonzalez et B. Adenso-Diaz. *A scatter search approach to the optimum disassembly sequence problem*. Computers & Operations Research, vol. 33, pages 1776–1793, 2006. (Cité en page 16.)
- [Grochowski & Tang 2009] D.E. Grochowski et Y. Tang. *A machine learning approach for optimal disassembly planning*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 22, pages 374–383, 2009. (Cité en page 14.)
- [Gu & Gao 2011] Q. Gu et T. Gao. *Simulation for disassembly planning of used-product in reverse supply chain*. ICIC Express Letters, Part B : Applications, vol. 2, no. 6, pages 1315–1320, 2011. (Cité en page 14.)
- [Guerriero & Miltenburg 2003] Franco Guerriero et John Miltenburg. *The stochastic U-line balancing problem*. Naval Research Logistics (NRL), vol. 50, no. 1, pages 31–57, 2003. (Cité en page 30.)
- [Güngör & Gupta 1997] A. Güngör et S.M. Gupta. *An evaluation methodology for disassembly processes*. Computers & Industrial Engineering, vol. 33, pages 329–332, 1997. (Cité en page 16.)
- [Güngör & Gupta 1998] A. Güngör et S.M. Gupta. *Disassembly sequence planning for products with defective parts in product recovery*. Computers & Industrial Engineering, vol. 35, pages 161–164, 1998. (Cité en page 16.)

- [Güngör & Gupta 1999a] Aşkiner Güngör et Surendra M. Gupta. *Disassembly line balancing*. In Proceedings of the 1999 Annual Meeting of the Northeast Decision Sciences Institute, pages 193–195, 1999. (Cité en page 17.)
- [Güngör & Gupta 1999b] Aşkiner Güngör et Surendra M. Gupta. *Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery : a survey*. Computers & Industrial Engineering, vol. 36, pages 811–853, 1999. (Cité en pages 8 et 11.)
- [Güngör & Gupta 2001a] A. Güngör et S. M. Gupta. *Disassembly sequence plan generation using a branch and bound algorithm*. International Journal of Production Research, vol. 39, no. 3, pages 481–509, 2001. (Cité en page 16.)
- [Güngör & Gupta 2001b] Aşkiner Güngör et Surenda M. Gupta. *A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures*. International Journal of Production Research, vol. 39, no. 7, pages 1427–1467, 2001. (Cité en pages 11 et 18.)
- [Güngör & Gupta 2002] Aşkiner Güngör et Surendra M. Gupta. *Disassembly line in product recovery*. International Journal of Production Research, vol. 40, no. 11, pages 2569–2589, 2002. (Cité en page 17.)
- [Guo *et al.* 2012] X. . Guo, S. . Liu et D. . Wang. *Scatter search for solving multi-objective disassembly sequence optimization problems*. Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University, vol. 33, no. 1, pages 56–59, 2012. (Cité en page 16.)
- [Gupta & Taleb 1994] S.M. Gupta et K.N. Taleb. *Scheduling disassembly*. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 8, pages 1857–1866, 1994. (Cité en pages 10 et 14.)
- [Gurevsky *et al.* 2012] Evgeny Gurevsky, Olga Battaïa et Alexandre Dolgui. *Balancing of simple assembly lines under variations of task processing times*. Annals of Operations Research, vol. 201, no. 1, pages 265–286, 2012. (Cité en page 30.)
- [Gurevsky *et al.* 2013a] E. Gurevsky, Ö. Hazir, O. Battaïa et A. Dolgui. *Robust balancing of straight assembly lines with interval task times*. Journal of the Operational Research Society, vol. 64, no. 11, pages 1607–1613, Nov 2013. (Cité en page 30.)
- [Gurevsky *et al.* 2013b] Evgeny Gurevsky, Olga Battaïa et Alexandre Dolgui. *Stability measure for a generalized assembly line balancing problem*. Discrete Applied Mathematics, vol. 161, no. 3, pages 377 – 394, 2013. (Cité en page 30.)
- [Haitao & Liang 2014] Z. Haitao et C. Liang. *Disassembly sequence planning of steam turbines for virtual maintenance*, volume 572 of *Key Engineering Materials*, chapitre V. CAD/CAM/CAE, pages 335–339. 2014. (Cité en page 16.)
- [Han *et al.* 2013] H. . Han, J. . Yu et D. . Lee. *Mathematical model and solution algorithms for selective disassembly sequencing with multiple target components and sequence-*

- dependent setups*. International Journal of Production Research, vol. 51, no. 16, pages 4997–5010, 2013. (Cité en page 16.)
- [Hassan & Yoon 2010] S. Hassan et J. Yoon. *Haptic guided optimized aircraft maintenance assembly disassembly path planning scheme*. In ICCAS 2010 - International Conference on Control, Automation and Systems, pages 1667–1672, 2010. (Cité en page 16.)
- [Hazır & Dolgui 2013] Öncü Hazır et Alexandre Dolgui. *Assembly line balancing under uncertainty : Robust optimization models and exact solution method*. Computers & Industrial Engineering, vol. 65, no. 2, pages 261 – 267, 2013. (Cité en page 30.)
- [Held *et al.* 1974] M. Held, P. Wolfe et H.P. Crowder. *Validation of subgradient optimization*. Math Program, vol. 6, no. 1, pages 62–88, 1974. (Cité en page 92.)
- [Helgeson & Birnie 1961] W. B. Helgeson et D. P. Birnie. *Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique*. Journal of Industrial Engineering, vol. 12, pages 394–398, 1961. (Cité en page 94.)
- [Helton & Davis 2003] J. C. Helton et F. J. Davis. *Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems*. Reliability Engineering & System Safety, vol. 81, no. 1, pages 23–69, 2003. (Cité en page 45.)
- [Henig 1986] Mordechai I. Henig. *Extensions of the dynamic programming method in the deterministic and stochastic assembly-line balancing problems*. Computers & Operations Research, vol. 13, no. 4, pages 443 – 449, 1986. (Cité en page 30.)
- [Holmberg & Yuan 2000] Kaj Holmberg et Di Yuan. *A Lagrangian Heuristic Based Branch-and-Bound Approach for the Capacitated Network Design Problem*. Operations Research, vol. 48, no. 3, pages 461–481, 2000. (Cité en page 90.)
- [Hop 2006] N. V. Hop. *A heuristic solution for fuzzy mixed-model line balancing problem*. European Journal Of Operational Research, vol. 168, pages 789–810, 2006. (Cité en page 30.)
- [Hsin-Hao *et al.* 2000] H. Hsin-Hao, M.H. Wang et M.R. Johnson. *Disassembly sequence generation using a neural network approach*. Journal of Manufacturing Systems, vol. 19, pages 73–82, 2000. (Cité en page 16.)
- [Hu *et al.* 2009] X. Hu, W. Zhu, T. Yu et Z. Xiong. *A script-driven virtual assembly simulation system based on assembly sequence concurrent planning*. In 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2009, pages 2478–2483, 2009. (Cité en page 16.)
- [Hui *et al.* 2008] W. Hui, X. Dong et D. Guanghong. *A genetic algorithm for product disassembly sequence planning*. Neurocomputing, vol. 71, pages 2720–2726, 2008. (Cité en page 16.)

- [Iacob *et al.* 2012] R. Iacob, D. Popescu et P. Mitrouchev. *Assembly/Disassembly analysis and modeling techniques : A review*. Strojnski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, vol. 58, no. 11, pages 653–664, 2012. (Cité en page 14.)
- [Ilgin & Gupta 2010] Mehmet A. Ilgin et Surendra M. Gupta. *Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO) : A review of the state of the art*. Journal of environmental management, vol. 91, no. 3, pages 563–591, 2010. (Cité en pages 12 et 13.)
- [Ilgin & Gupta 2012] M.A. Ilgin et S.M. Gupta. *Remanufacturing modeling and analysis*. CRC Press, 2012. (Cité en page 10.)
- [Jagannathan 1974] R. Jagannathan. *Chance-Constrained Programming with Joint Constraints*. Operations Research, vol. 22, no. 2, pages 358–372, 1974. (Cité en pages 78 et 80.)
- [Javorova *et al.* 2011] A. Javorova, E. Hruskova et K. Velisek. *Assembly and disassembly via automation tools*, volume 467-469 of *Key Engineering Materials*. 2011. (Cité en page 19.)
- [Johnson & Wang 1995] M. R. Johnson et M. H. Wang. *Planning product disassembly for material recovery opportunities*. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 11, pages 3119–3142, 1995. (Cité en page 1.)
- [Johnson 1983] Roger V. Johnson. *A branch and bound algorithm for assembling line balancing problems with formulation irregularities*. Management Science, vol. 29, no. 11, pages 1309–1324, 1983. (Cité en page 29.)
- [Kaebernick *et al.* 2000] H. Kaebernick, B. O'Shea et S.S. Grewal. *A method for sequencing the disassembly of products*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 49, pages 13–16, 2000. (Cité en page 16.)
- [Kalayci & Gupta 2011] C. B. Kalayci et S. M. Gupta. *Tabu search for disassembly line balancing with multiple objectives*. In Proceedings of the 41st International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE41), pages 477–482, 2011. (Cité en page 18.)
- [Kalayci & Gupta 2013a] C. B. Kalayci et S. M. Gupta. *Balancing a sequence dependent disassembly line using simulated annealing algorithm*, volume 16 of *Applications of Management Science*, pages 81–103. Emerald Group Publishing Limited, 2013. (Cité en page 18.)
- [Kalayci & Gupta 2013b] C. B. Kalayci et S. M. Gupta. *Simulated annealing algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem*. In IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), pages 93–98, 2013. (Cité en page 18.)

- [Kalayci & Gupta 2013c] C. B. Kalayci et Surendra M. Gupta. *Ant colony optimization for sequence-dependent disassembly line balancing problem*. Journal of Manufacturing Technology Management, vol. 24, no. 3, pages 413–427, 2013. (Cité en page 18.)
- [Kalayci & Gupta 2013d] C. B. Kalayci et Surendra M. Gupta. *A particle swarm optimization algorithm with neighborhood-based mutation for sequence-dependent disassembly line balancing problem*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 69, no. 1–4, pages 197–209, 2013. (Cité en page 18.)
- [Kalayci & Gupta 2013e] C. B. Kalayci et Surendra M. Gupta. River formation dynamics approach for sequence-dependent disassembly line balancing problem, chapitre 12, pages 289–312. CRC Press, 2013. (Cité en page 18.)
- [Kalayci & Gupta 2014] C. B. Kalayci et Surendra M. Gupta. *A tabu search algorithm for balancing a sequence-dependent disassembly line*. Production Planning & Control, vol. 25, no. 2, pages 149–160, 2014. (Cité en page 18.)
- [Kalayci et al. 2012] C. B. Kalayci, Surendra M. Gupta et Kenichi Nakashima. *A Simulated Annealing Algorithm for Balancing a Disassembly Line*. In Mitsutaka Matsumoto, Yasushi Umeda, Keijiro Masui et Shinichi Fukushima, éditeurs, Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society, pages 714–719. Springer Netherlands, 2012. (Cité en page 18.)
- [Kall & Wallace 1994] Peter Kall et Stein W. Wallace. Stochastic programming. John Wiley & Sons, Chichester, 2 édition, 1994. (Cité en pages 45 et 49.)
- [Kang & Hong 2010] C. Kang et Y. S. Hong. *Dynamic disassembly planning for remanufacturing of multiple types of products*. In Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, volume 6, pages 385–394, 2010. (Cité en page 14.)
- [Kang et al. 2012] K. . Kang, H. . Doh, J. . Park et D. . Lee. *Disassembly leveling and lot sizing for multiple product types : a basic model and its extension*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pages 1–11, 2012. (Cité en page 14.)
- [Kao 1976] Edward P. C. Kao. *A Preference Order Dynamic Program for Stochastic Assembly Line Balancing*. Management Science, vol. 22, no. 10, pages 1097–1104, 1976. (Cité en page 30.)
- [Kao 1979] Edward P.C. Kao. *Computational experience with a stochastic assembly line balancing algorithm*. Computers & Operations Research, vol. 6, no. 2, pages 79–86, 1979. (Cité en page 29.)
- [Kara et al. 2006] S Kara, P Pornprasitpol et H Kaebernick. *Selective Disassembly Sequencing : A Methodology for the Disassembly of End-of-Life Products*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 55, no. 1, pages 37–40, 2006. (Cité en page 14.)

- [Kazmierczak *et al.* 2004] K. Kazmierczak, J. Winkel et R.H Westgaard. *Car disassembly and ergonomics in Sweden : current situation and future perspectives in light of new environmental legislation*. International Journal of Production Research, vol. 42, pages 1305–1324, 2004. (Cité en page 19.)
- [Kazmierczak *et al.* 2005] Karolina Kazmierczak, Svend Erik Mathiassen, Mikael Forsman et Jørgen Winkel. *An integrated analysis of ergonomics and time consumption in Swedish ‘craft-type’ car disassembly*. Applied Ergonomics, vol. 36, no. 3, pages 263 – 273, 2005. (Cité en page 19.)
- [Kazmierczak *et al.* 2007] K. Kazmierczak, W.P. Neumann et J. Winkel. *A case study of serial-flow car disassembly : ergonomics, productivity and potential system performance*. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, vol. 17, pages 331–351, 2007. (Cité en page 19.)
- [Kim & Lee 2011] D. . Kim et D. . Lee. *A heuristic for multi-period disassembly leveling and scheduling*. In 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SII 2011, pages 762–767, 2011. (Cité en page 14.)
- [Kim & Xirouchakis 2010] H. . Kim et P. Xirouchakis. *Capacitated disassembly scheduling with random demand*. International Journal of Production Research, vol. 48, no. 23, pages 7177–7194, 2010. (Cité en page 14.)
- [Kim *et al.* 2003] H.J. Kim, D.H. Lee, P. Xirouchakis et R. Zust. *Disassembly scheduling with multiple product types*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 52, pages 403–406, 2003. (Cité en page 14.)
- [Kim *et al.* 2006a] H.J. Kim, D.H. Lee et P. Xirouchakis. *A Lagrangean heuristic algorithm for disassembly scheduling with capacity constraints*. Journal of the Operational Research Society, vol. 57, pages 1231–1240, 2006. (Cité en page 14.)
- [Kim *et al.* 2006b] H.J. Kim, D.H. Lee et P. Xirouchakis. *Two-phase heuristic for disassembly scheduling with multiple product types and parts commonality*. International Journal of Production Research, vol. 44, pages 195–212, 2006. (Cité en page 14.)
- [Kim *et al.* 2006c] Jun-Gyu Kim, Hyong-Bae Jeon, Hwa-Joong Kim, Dong-Ho Lee et Paul Xirouchakis. *Disassembly scheduling with capacity constraints : Minimizing the number of products disassembled*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture, vol. 220, no. 9, pages 1473–1481, 2006. (Cité en page 14.)
- [Kim *et al.* 2007] H.-J. Kim, D.-H. Lee et P. Xirouchakis. *Disassembly scheduling : literature review and future research directions*. International Journal of Production Research, vol. 45, no. 18-19, pages 4465–4484, 2007. (Cité en page 13.)

- [Kim *et al.* 2009a] H. . Kim, S. Chiotellis et G. Seliger. *Dynamic process planning control of hybrid disassembly systems*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 40, no. 9-10, pages 1016–1023, 2009. (Cité en page 14.)
- [Kim *et al.* 2009b] H.J. Kim, S. Kernbaum et G. Seliger. *Emulation-based control of a disassembly system for LCD monitors*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 40, pages 383–392, 2009. (Cité en page 19.)
- [Kim *et al.* 2009c] H.J. Kim, D.H. Lee, P. Xirouchakis et O.K. Kwon. *A branch and bound algorithm for disassembly scheduling with assembly product structure*. Journal of the Operational Research Society, vol. 60, pages 419–430, 2009. (Cité en page 14.)
- [Kleywegt *et al.* 2001] A. J. Kleywegt, A. Shapiro et T. Homem-De-Mello. *The sample average approximation method for stochastic discrete optimization*. SIAM Journal of Optimization, vol. 12, pages 47–502, 2001. (Cité en pages 44 et 50.)
- [Klincewicz 1986] Hanan Klincewicz John G. Luss. *A Lagrangian Relaxation Heuristic for Capacitated Facility Location with Single-Source Constraints*. The Journal of the Operational Research Society, vol. 37, page 5, 1986. (Cité en page 90.)
- [Koc *et al.* 2009] Ali Koc, Ihsan Sabuncuoglu et Erdal Erel. *Two exact formulations for disassembly line balancing problems with task precedence diagram construction using an AND/OR graph*. IIE Transactions, vol. 41, no. 10, pages 866–881, 2009. (Cité en pages 18, 25 et 56.)
- [Kongar & Gupta 2006] E. Kongar et S.M. Gupta. *Disassembly sequencing using genetic algorithm*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 30, pages 497–506, 2006. (Cité en page 16.)
- [Koppensteiner *et al.* 2013] Gottfried Koppensteiner, Christoph Krofitsch, Reinhard Hammetner, DavidP. Miller et Munir Merdan. *Application of Knowledge Driven Mobile Robots for Disassembly Tasks*. In Gourab Sen Gupta, Donald Bailey, Serge Demidenko et Dale Carnegie, éditeurs, Recent Advances in Robotics and Automation, volume 480 of *Studies in Computational Intelligence*, pages 311–321. Springer Berlin Heidelberg, 2013. (Cité en page 19.)
- [Kroll 1996] E. Kroll. *Application of work-measurement analysis to product disassembly for recycling*. Concurrent Engineering, vol. 4, pages 149–158, 1996. (Cité en page 19.)
- [Kumar *et al.* 2003] S. Kumar, R. Kumar, R. Shankar et M.K. Tiwari. *Expert enhanced coloured stochastic Petri net and its application in assembly/disassembly*. International Journal of Production Research, vol. 41, pages 2727–2762, 2003. (Cité en page 16.)
- [Kuo 2000] T.C. Kuo. *Disassembly sequence and cost analysis for electromechanical products*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 16, pages 43–45, 2000. (Cité en page 16.)

- [Lage Jr. & Filho 2012] M. Lage Jr. et M. G. Filho. *Production planning and control for remanufacturing : Literature review and analysis*. Production Planning and Control, vol. 23, no. 6, pages 419–435, 2012. (Cité en page 14.)
- [Lambert & Gupta 2005a] A. J. D. Lambert et Surendra M. Gupta. *A heuristic solution for the disassembly line balancing problem incorporating sequence dependent costs*. In Proc. SPIE 5997, Environmentally Conscious Manufacturing V, 59970A, 2005. (Cité en page 18.)
- [Lambert & Gupta 2005b] A.J.D. Lambert et S.M. Gupta. *Disassembly modeling for assembly, maintenance, reuse, and recycling*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2005. (Cité en pages 10 et 13.)
- [Lambert & Gupta 2008] A.J.D. Lambert et S.M. Gupta. *Methods for optimum and near optimum disassembly sequencing*. International Journal of Production Research, vol. 46, no. 11, pages 2845–2865, 2008. (Cité en pages 14 et 16.)
- [Lambert 1997] A. J. D. Lambert. *Optimal disassembly of complex products*. International Journal of Production Research, vol. 35, no. 9, pages 2509–2523, 1997. (Cité en page 16.)
- [Lambert 1999] A. J. D. Lambert. *Linear programming in disassembly/clustering sequence generation*. Computers & Industrial Engineering, vol. 36, no. 4, pages 723–738, 1999. (Cité en pages 16, 25 et 56.)
- [Lambert 2006] A.J.D. Lambert. *Exact methods in optimum disassembly sequence search for problems subject to sequence dependent costs*. Omega, vol. 34, pages 538–549, 2006. (Cité en page 16.)
- [Lambert 2007] A.J.D. Lambert. *Optimizing disassembly processes subjected to sequence dependent cost*. Computers & Operations Research, vol. 34, pages 536–551, 2007. (Cité en page 16.)
- [Lee & Xirouchakis 2004] D.H. Lee et P. Xirouchakis. *A two-stage heuristic for disassembly scheduling with assembly product structure*. Journal of the Operational Research Society, vol. 55, pages 287–297, 2004. (Cité en page 14.)
- [Lee et al. 2002] D.H. Lee, P. Xirouchakis et R. Züst. *Disassembly scheduling with capacity constraints*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 51, pages 387–390, 2002. (Cité en page 14.)
- [Lee et al. 2004] D.H. Lee, H.J. Kim, G. Choi et P. Xirouchakis. *Disassembly scheduling : integer programming models*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Engineering Manufacture, vol. 218, pages 357–1372, 2004. (Cité en page 14.)
- [Lee et al. 2010] H. B. Lee, N. W. Cho et Y. S. Hong. *A hierarchical end-of-life decision model for determining the economic levels of remanufacturing and disassembly un-*

- der environmental regulations*. Journal of Cleaner Production, vol. 18, no. 13, pages 1276–1283, 2010. (Cité en page 14.)
- [Li *et al.* 2005] J.R. Li, L.P. Khoo et S.B. Tor. *An object-oriented intelligent disassembly sequence planner for maintenance*. Computers in Industry, vol. 56, pages 699–718, 2005. (Cité en page 16.)
- [Li *et al.* 2009] C. Li, F. Liu, H. Cao et Q. Wang. *A stochastic dynamic programming based model for uncertain production planning of re-manufacturing system*. International Journal of Production Research, vol. 47, no. 13, pages 3657–3668, 2009. (Cité en page 14.)
- [Li *et al.* 2013] W. D. Li, K. Xia, L. Gao et K. . Chao. *Selective disassembly planning for waste electrical and electronic equipment with case studies on liquid crystal displays*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 29, no. 4, pages 248–260, 2013. (Cité en page 16.)
- [Liu *et al.* 2005] S.B. Liu, H.L. Ong et H.C. Huang. *A bidirectional heuristic for stochastic assembly line balancing Type II problem*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 25, pages 71–77, 2005. (Cité en page 30.)
- [Liu *et al.* 2011] Z. Liu, D. Hu et B. Li. *Model and solution to the product Disassembly Sequence Planning*. International Journal of Environmental Technology and Management, vol. 14, no. 5-6, pages 501–515, 2011. (Cité en page 16.)
- [Liu *et al.* 2013] B. . Liu, W. . Chen et S. Huang. *Research on disassembly line balancing problem in the presence of uncertain cycle time*. In International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation : Core Areas of Industrial Engineering, IEMI 2012 - Proceedings, pages 497–507, 2013. (Cité en pages 18 et 77.)
- [Lobo *et al.* 1998] Miguel Sousa Lobo, Lieven Vandenberghe, Stephen Boyd et Hervé Lebre. *Applications of second-order cone programming*. Linear Algebra and its Applications, vol. 284, pages 193–228, 1998. (Cité en page 75.)
- [Lu & Liu 2012] C. Lu et Y. . Liu. *A disassembly sequence planning approach with an advanced immune algorithm*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 226, no. 11, pages 2739–2749, 2012. (Cité en page 16.)
- [Lu & Sun 2010] Z. Lu et Y. Sun. *Disassembly sequence planning of civil aircraft products for maintainability design*. Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, vol. 31, no. 1, pages 143–150, 2010. (Cité en page 16.)
- [Lucas *et al.* 2001] C. Lucas, S. A. MirHassani, G. Mitra et C. A. Poojari. *An Application of Lagrangian Relaxation to a Capacity Planning Problem under Uncertainty*. The

- Journal of the Operational Research Society, vol. 52, no. 11, pages 1256–1266, 2001. (Cité en page 90.)
- [Lyu 1997] JrJung Lyu. *A single-run optimization algorithm for stochastic assembly line balancing problems*. Journal of Manufacturing Systems, vol. 16, no. 3, pages 204 – 210, 1997. (Cité en page 29.)
- [Ma *et al.* 2011] Yoen-Seok Ma, Hong-Bae Jun, Hyung-Won Kim et Dong-Ho Lee. *Disassembly process planning algorithms for end of life product recovery and environmentally conscious disposal*. International Journal of Production Research, vol. 49, no. 23, pages 7007–7027, 2011. (Cité en pages 8 et 56.)
- [Magnani & Boyd 2009] Alessandro Magnani et Stephen P. Boyd. *Convex piecewise-linear fitting*. Optimization and Engineering, vol. 10, no. 1, pages 1–17, 2009. (Cité en page 75.)
- [Masclé & Balasoiu 2003] C. Masclé et B.A. Balasoiu. *Algorithmic selection of a disassembly sequence of a component by a wave propagation method*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, vol. 19, pages 439–448, 2003. (Cité en page 16.)
- [Mayyas *et al.* 2012] Ahmad Mayyas, Ala Qattawi, Mohammed Omar et Dongri Shan. *Design for sustainability in automotive industry : A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 4, pages 1845–1862, 2012. (Cité en page 1.)
- [McGovern & Gupta 2005] Seamus M. McGovern et Surendra M. Gupta. *Uninformed and probabilistic distributed agent combinatorial searches for the unary NP-complete disassembly line balancing problem*. In Proc. SPIE 5997, Environmentally Conscious Manufacturing V, 59970B, 2005. (Cité en page 17.)
- [McGovern & Gupta 2006] Seamus M. McGovern et Surendra M. Gupta. *Ant colony optimization for disassembly sequencing with multiple objectives*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 30, no. 5-6, pages 481–496, 2006. (Cité en pages 16 et 17.)
- [McGovern & Gupta 2007a] S. M. McGovern et S. M. Gupta. *Combinatorial optimization analysis of the unary NP-complete disassembly line balancing problem*. International Journal of Production Research, vol. 45, no. 18-19, pages 4485–4511, 2007. (Cité en page 18.)
- [McGovern & Gupta 2007b] Seamus M. McGovern et Surendra M. Gupta. *A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing*. European Journal of Operational Research, vol. 179, no. 3, pages 692–708, 2007. (Cité en page 17.)
- [McGovern & Gupta 2011] Seamus M. McGovern et Surendra M. Gupta. *The disassembly line, balancing and modeling*. McGraw-Hill Companies, New York, 2011 édition, 2011. (Cité en pages 17 et 22.)

- [McMullen & Frazier 1997] Patrick R. McMullen et Gregory V. Frazier. *A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations*. International Journal of Production Economics, vol. 51, no. 3, pages 177 – 190, 1997. (Cité en page 30.)
- [Md. Dawal *et al.* 2013] S. Z. Md. Dawal, R. A. Raja Ghazilla, H. R. Zadry, M. Widia et N. S. Abdullah. Incorporating ergonomics evaluation in assembly and disassembly of repetitive task : Focusing on load task, volume 712-715 of *Advanced Materials Research*, chapitre 25 : Industrial Design and Product Design : Theory and Practice, pages 2879–2883. 2013. (Cité en page 19.)
- [Mesfin & Shuhaimi 2010] G. Mesfin et M. Shuhaimi. *A chance constrained approach for a gas processing plant with uncertain feed conditions*. Computers and Chemical Engineering, vol. 34, no. 8, pages 1256–1267, 2010. (Cité en page 77.)
- [Mi *et al.* 2011] X. Mi, X. Zhen, S. Zhou et W. Fan. *Research and implementation on visualization system of disassembly sequence planning based on Ant colony algorithm*. In Proceedings of the 2011 15th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2011, pages 581–585, 2011. (Cité en page 16.)
- [Minca *et al.* 2012a] E. Minca, A. Filipescu et A. Voda. *New approach in control of assembly/disassembly line served by robotic manipulator mounted on mobile platform*. In Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on, pages 235–240, Dec 2012. (Cité en page 19.)
- [Minca *et al.* 2012b] E. Minca, V. Stefan, A. Filipescu, A. Serbencu et A. Filipescu. *Two approaches in modeling of assembly/disassembly line with integrated manipulator mounted on mobile platform*. In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2012 16th International Conference on, pages 1–6, Oct 2012. (Cité en page 19.)
- [Moore *et al.* 1998] K.E. Moore, A. Gungor et S.M. Gupta. *A Petri net approach to disassembly process planning*. Computers & Industrial Engineering, vol. 35, pages 165–168, 1998. (Cité en page 16.)
- [Moore *et al.* 2001] K.E. Moore, A. Gungor et S.M. Gupta. *Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships*. European Journal of Operational Research, vol. 135, pages 428–449, 2001. (Cité en page 16.)
- [Morgan & Gagnon 2013] S. D. Morgan et R. J. Gagnon. *A systematic literature review of remanufacturing scheduling*. International Journal of Production Research, vol. 51, no. 16, pages 4853–4879, 2013. (Cité en page 14.)
- [Morselli *et al.* 2010] Luciano Morselli, Alessandro Santini, Fabrizio Passarini et Ivano Vassura. *Automotive shredder residue (ASR) characterization for a valuable manage-*

- ment*. Waste Management, vol. 30, no. 11, pages 2228 – 2234, 2010. (Cité en page 1.)
- [Moyer & Gupta 1997] L.K. Moyer et S.M. Gupta. *Environmental concerns and recycling/disassembly efforts in the electronics industry*. Journal of Electronics Manufacturing, vol. 7, no. 1, pages 1–22, 1997. (Cité en page 1.)
- [Nemirovski & Shapiro 2007] A. Nemirovski et A. Shapiro. *Convex Approximations of Chance Constrained Programs*. SIAM Journal on Optimization, vol. 17, no. 4, pages 969–996, 2007. (Cité en page 75.)
- [Nemirovski 2012] Arkadi Nemirovski. *On safe tractable approximations of chance constraints*. European Journal of Operational Research, vol. 219, no. 3, pages 707 – 718, 2012. (Cité en page 77.)
- [Noon & Bean 1991] Charles E. Noon et James C. Bean. *A Lagrangian Based Approach for the Asymmetric Generalized Traveling Salesman Problem*. Operations Research, vol. 39, no. 4, pages 623–632, 1991. (Cité en page 90.)
- [Ondemir & Gupta 2014] O. Ondemir et S. M. Gupta. *A multi-criteria decision making model for advanced repair-to-order and disassembly-to-order system*. European Journal of Operational Research, vol. 233, no. 2, pages 408–419, 2014. (Cité en page 14.)
- [Opalić et al. 2010] M. Opalić, M. Kljajin et K. Vučković. *Disassembly layout in WEEE recycling process*. Strojarstvo, vol. 52, no. 1, pages 51–58, 2010. (Cité en page 19.)
- [Özcan et al. 2011] Uğur Özcan, Talip Kellegöz et Bilal Toklu. *A genetic algorithm for the stochastic mixed-model U-line balancing and sequencing problem*. International Journal of Production Research, vol. 49, no. 6, pages 1605–1626, 2011. (Cité en page 30.)
- [Özcan 2010] Uğur Özcan. *Balancing stochastic two-sided assembly lines : A chance-constrained, piecewise-linear, mixed integer program and a simulated annealing algorithm*. European Journal of Operational Research, vol. 205, no. 1, pages 81 – 97, 2010. (Cité en page 30.)
- [Özceylan & Paksoy 2013] E. Özceylan et T. Paksoy. *Reverse supply chain optimisation with disassembly line balancing*. International Journal of Production Research, vol. 51, no. 20, pages 5985–6001, 2013. (Cité en page 18.)
- [Özceylan & Paksoy 2014a] Eren Özceylan et Turan Paksoy. *Fuzzy mathematical programming approaches for reverse supply chain optimization with disassembly line balancing problem*. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, vol. 26, no. 4, pages 1969–1985, 2014. (Cité en page 31.)
- [Özceylan & Paksoy 2014b] Eren Özceylan et Turan Paksoy. *Interactive fuzzy programming approaches to the strategic and tactical planning of a closed-loop supply chain*

- under uncertainty*. International Journal of Production Research, vol. 52, no. 8, pages 2363–2387, 2014. (Cité en page 31.)
- [Özceylan *et al.* 2014] E. Özceylan, T. Paksoy et T. Bektaş. *Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing*. Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review, vol. 61, pages 142–164, 2014. (Cité en page 18.)
- [Park *et al.* 1998] June S. Park, Byung Ha Lim et Youngho Lee. *A Lagrangian Dual-Based Branch-and-Bound Algorithm for the Generalized Multi-Assignment Problem*. Management Science, vol. 44, no. 12, pages S271–S282, 1998. (Cité en page 90.)
- [Parliament 2012] European Parliament. *Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*, 2012. (Cité en page 6.)
- [Penuel *et al.* 2010] John Penuel, J. Cole Smith et Yang Yuan. *An integer decomposition algorithm for solving a two-stage facility location problem with second-stage activation costs*. Naval Research Logistics (NRL), vol. 57, no. 5, pages 391–402, 2010. (Cité en page 41.)
- [Percoco & Diella 2013] G. Percoco et M. Diella. *Preliminary evaluation of artificial bee colony algorithm when applied to multi objective partial disassembly planning*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, vol. 6, no. 17, pages 3234–3243, 2013. (Cité en page 16.)
- [Poojari & Varghese 2008] Chandra A. Poojari et Bobby Varghese. *Genetic Algorithm based technique for solving Chance Constrained Problems*. European Journal of Operational Research, vol. 185, no. 3, pages 1128 – 1154, 2008. (Cité en page 77.)
- [Popa *et al.* 2012] C. L. Popa, R. C. Parpala et C. E. Cotet. *Contact identification for assembly/disassembly process in CAD-CAE software*. In 23rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation 2012, volume 2, pages 613–616, 2012. (Cité en page 19.)
- [Prakash *et al.* 2012] P. K. S. Prakash, D. Ceglarek et M. K. Tiwari. *Constraint-based simulated annealing (CBSA) approach to solve the disassembly scheduling problem*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 60, no. 9-12, pages 1125–1137, 2012. (Cité en page 14.)
- [Prékopa *et al.* 2011] András Prékopa, Kunikazu Yoda et Munevver Mine Subasi. *Uniform quasi-concavity in probabilistic constrained stochastic programming*. Operations Research Letters, vol. 39, no. 3, pages 188–192, 2011. (Cité en page 75.)
- [Puente *et al.* 2010] S. T. Puente, F. Torres, O. Reinoso et L. Paya. *Disassembly planning strategies for automatic material removal*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 46, no. 1-4, pages 339–350, 2010. (Cité en page 16.)

- [Rai *et al.* 2002] Rahul Rai, Varun Rai, M. K. Tiwari et Venkat Allada. *Disassembly sequence generation : A Petri net based heuristic approach*. International Journal of Production Research, vol. 40, no. 13, pages 3183–3198, 2002. (Cité en page 16.)
- [Raouf & Tsui 1982] A. Raouf et C. L. Tsui. *A new method for assembly line balancing having stochastic work elements*. Computers & Industrial Engineering, vol. 6, no. 2, pages 131–148, 1982. (Cité en page 29.)
- [Reich 2013] Daniel Reich. *A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints*. European Journal of Operational Research, vol. 230, no. 3, pages 487 – 494, 2013. (Cité en page 77.)
- [Reveliotis 2007] S.A. Reveliotis. *Uncertainty management in optimal disassembly planning through learning-based strategies*. IIE Transactions, vol. 39, pages 645–658, 2007. (Cité en page 16.)
- [Rios & Stuart 2004] P.J. Rios et J.A. Stuart. *Scheduling selective disassembly for plastics recovery in an electronics recycling center*. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 27, pages 187–197, 2004. (Cité en page 14.)
- [Ruijun *et al.* 2011] L. Ruijun, T. Guangdong, Z. Xueyi, Z. Anyan, W. Xiaolan et N. Qingning. *Disassembly sequence optimization for automotive product based on probabilistic planning method*. In 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet 2011 - Proceedings, pages 284–288, 2011. (Cité en page 16.)
- [Santini *et al.* 2011] Alessandro Santini, Luciano Morselli, Fabrizio Passarini, Ivano Vassura, Salvatore Di Carlo et Francesco Bonino. *End-of-Life Vehicles management : Italian material and energy recovery efficiency*. Waste Management, vol. 31, pages 489–494, 2011. (Cité en page 6.)
- [Santoso *et al.* 2005] Tjendera Santoso, Shabbir Ahmed, Marc Goetschalckx et Alexander Shapiro. *A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty*. European Journal of Operational Research, vol. 167, no. 1, pages 96–115, 2005. (Cité en page 43.)
- [Sarin *et al.* 1999] Subhash C. Sarin, Erdal Erel et Ezey M. Dar-el. *A methodology for solving single-model , stochastic assembly line balancing problem*. The International Journal of Management Science, vol. 27, pages 525–535, 1999. (Cité en page 30.)
- [Sarin *et al.* 2006] S.C. Sarin, H.D. Sherali et A. Bhootra. *A precedence-constrained asymmetric traveling salesman model for disassembly optimization*. IIE Transactions, vol. 38, pages 223–237, 2006. (Cité en page 16.)
- [Schumacher & Jouaneh 2013] P. Schumacher et M. Jouaneh. *A system for automated disassembly of snap-fit covers*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 69, no. 9-12, pages 2055–2069, 2013. (Cité en page 19.)

- [Seliger *et al.* 2002] G. Seliger, B. Basdere, T. Keil et U. Rebafka. *Innovative processes and tools for disassembly*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 51, pages 37–40, 2002. (Cité en page 19.)
- [Seo *et al.* 2001] K.K. Seo, J.H. Park et D.S. Jang. *Optimal disassembly sequence using genetic algorithms considering economic and environmental aspects*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 18, pages 371–380, 2001. (Cité en page 16.)
- [Shapiro 1979a] J.F. Shapiro. *Mathematical programming : Structures and algorithms*. John Wiley & Sons Inc, 1979. (Cité en page 91.)
- [Shapiro 1979b] J.F. Shapiro. *A survey of Lagrangian techniques for discrete optimization*. Ann Discret Math, vol. 5, pages 113–138, 1979. (Cité en page 91.)
- [Shen *et al.* 2010] S. Shen, J.C. Smith et S. Ahmed. *Expectation and chance-constrained models and algorithms for insuring critical paths*. Management Science, vol. 56, no. 10, pages 1794–1814, 2010. (Cité en page 77.)
- [Shimizu *et al.* 2007] Y. Shimizu, K. Tsuji et M. Nomura. *Optimal disassembly sequence generation using a genetic programming*. International Journal of Production Research, vol. 45, pages 4537–4554, 2007. (Cité en page 16.)
- [Shin 1990] Dooyoung Shin. *An efficient heuristic for solving stochastic assembly line balancing problems*. Computers & Industrial Engineering, vol. 18, no. 3, pages 285–295, 1990. (Cité en page 29.)
- [Silverman & Carter 1986] Fred N. Silverman et John C. Carter. *A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages*. Management Science, vol. 32, no. 4, pages 455–463, 1986. (Cité en page 29.)
- [Singh *et al.* 2003] A.K. Singh, M.K. Tiwari et S.K. Mukhopadhyay. *Modelling and planning of the disassembly processes using an enhanced expert Petri net*. International Journal of Production Research, vol. 41, pages 3761–3792, 2003. (Cité en page 16.)
- [Smith & Chen 2011] S. S. Smith et W. . Chen. *Rule-based recursive selective disassembly sequence planning for green design*. Advanced Engineering Informatics, vol. 25, no. 1, pages 77–87, 2011. (Cité en page 16.)
- [Smith & Chen 2012] S. Smith et W. . Chen. *Multiple-Target selective disassembly sequence planning with disassembly sequence structure graphs*. In Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, volume 3, pages 1305–1314, 2012. (Cité en page 16.)
- [Smith & Grenchus Jr. 2009] J. J. Smith et E. J. Grenchus Jr. *Beyond the first user : Human factors and risk communication for reuse, recycling, disassembly, and product end-of-life*. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, volume 3, pages 1373–1377, 2009. (Cité en page 19.)

- [Smith *et al.* 2012] S. Smith, G. Smith et W. . Chen. *Disassembly sequence structure graphs : An optimal approach for multiple-target selective disassembly sequence planning*. Advanced Engineering Informatics, vol. 26, no. 2, pages 306–316, 2012. (Cité en page 16.)
- [Song & Pan 2012] X. . Song et X. . Pan. *Electromechanical product disassembly sequence planning based on partial destruction mode*. Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS, vol. 18, no. 5, pages 927–931, 2012. (Cité en page 16.)
- [Song *et al.* 2010] S. Song, D. Hu, Y. Gao, M. Yang et L. Zhang. *Product disassembly sequence planning based on constraint satisfaction problems*. Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering, vol. 21, no. 17, pages 2058–2062, 2010. (Cité en page 16.)
- [Song *et al.* 2013] X. . Song, X. . Pan, K. Feng et W. . Zhou. *Complex product disassembly sequence planning oriented to defective parts*. Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS, vol. 19, no. 6, pages 1249–1255, 2013. (Cité en page 16.)
- [Song *et al.* 2014] X. Song, W. Zhou, X. Pan et K. Feng. *Disassembly sequence planning for electro-mechanical products under a partial destructive mode*. Assembly Automation, vol. 34, no. 1, pages 106–114, 2014. (Cité en page 16.)
- [Stuart & Christina 2003] J.A. Stuart et V. Christina. *New metrics and scheduling rules for disassembly and bulk recycling*. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 26, pages 133–140, 2003. (Cité en page 14.)
- [Subramani & Dewhurst 1991] A. K. Subramani et P. Dewhurst. *Automatic generation of product disassembly sequences*. Annals of the CIRP, vol. 40, no. 1, pages 115–118, 1991. (Cité en page 14.)
- [Taleb & Gupta 1997] K.N. Taleb et S.M. Gupta. *Disassembly of multiple product structures*. Computers & Industrial Engineering, vol. 32, pages 94–961, 1997. (Cité en page 14.)
- [Taleb *et al.* 1997] K.N. Taleb, S.M. Gupta et L. Brennan. *Disassembly of complex product structures with parts and materials commonality*. Production Planning & Control, vol. 8, pages 255–269, 1997. (Cité en page 14.)
- [Tang & Zhou 2006] Y. Tang et M. C. Zhou. *A systematic approach to design and operation of disassembly lines*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 3, pages 324–329, 2006. (Cité en page 17.)
- [Tang & Zhou 2008] Y. Tang et M. Zhou. *Environment conscious manufacturing, chapitre Human-in-the-loop disassembly modeling and planning*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2008. (Cité en page 19.)

- [Tang *et al.* 2001] Ying Tang, Mengchu Zhou et Reggie Caudill. *A Systematic Approach to Disassembly Line Design*. In Electronics and the Environment. Proceedings of the IEEE International Symposium, pages 173–178, 2001. (Cité en page 17.)
- [Tang *et al.* 2006] Y. Tang, M. Zhou et M. Gao. *Fuzzy-Petri-net based disassembly planning considering human factors*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 36, pages 718–726, 2006. (Cité en page 16.)
- [Tian *et al.* 2009] Y. Tian, T. Wang, G. He et B. Ding. *Disassembly sequence planning based on generalized axis theory*. Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering, vol. 45, no. 5, pages 160–164+170, 2009. (Cité en page 16.)
- [Tian *et al.* 2013] G. Tian, M. Zhou et J. Chu. *A chance constrained programming approach to determine the optimal disassembly sequence*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 10, no. 4, pages 1004–1013, 2013. (Cité en page 16.)
- [Tiwari *et al.* 2001] M.K. Tiwari, N. Sinha, S. Kumar, R. Rai et S.K. Mukhopadhyay. *A Petri net based approach to determine the disassembly strategy of a product*. International Journal of Production Research, vol. 40, pages 1113–1129, 2001. (Cité en page 16.)
- [Toffel 2003] Michael W. Toffel. *The growing strategic importance of end-of-life product management*. California Management Review, vol. 45, no. 3, pages 102–129, 2003. (Cité en page 6.)
- [Toffel 2004] M. W. Toffel. *Strategic Management of Product Recovery*. California Management Review, vol. 46, no. 2, pages 120–141, 2004. (Cité en page 1.)
- [Torres & Aracil 2003] S.T. Torres F.and Puente et R. Aracil. *Disassembly planning based on precedence relations among assemblies*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 21, pages 317–327, 2003. (Cité en page 16.)
- [Torres *et al.* 2004] F. Torres, P. Gil, S.T. Puente, J. Pomares et R. Aracil. *Automatic PC disassembly for component recovery*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 23, pages 39–46, 2004. (Cité en page 19.)
- [Tripathi *et al.* 2009] Mukul Tripathi, Shubham Agrawal, Mayank Kumar Pandey, Ravi Shankar et M.K. Tiwari. *Real world disassembly modeling and sequencing problem : Optimization by Algorithm of Self-Guided Ants (ASGA)*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 25, no. 3, pages 483–496, 2009. (Cité en page 16.)
- [Tsai 2012] P. . Tsai. *A label correcting algorithm for partial disassembly sequences in the production planning for end-of-life products*. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2012, 2012. (Cité en page 16.)
- [Tseng *et al.* 2010] Y. . Tseng, H. . Kao et F. . Huang. *Integrated assembly and disassembly sequence planning using a GA approach*. International Journal of Production Research, vol. 48, no. 20, pages 5991–6013, 2010. (Cité en page 16.)

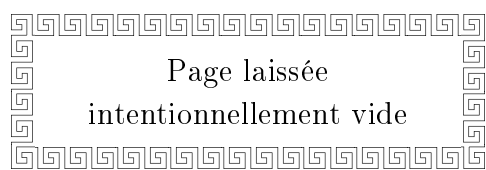
- [Tseng *et al.* 2011a] Y. . Tseng, F. . Huang et J. . Wang. *A particle swarm optimization and case-based reasoning model for sub-disassembly formation in the multi-plant disassembly sequence planning*. In 2011 17th International Conference on Concurrent Enterprising, ICE 2011 - Conference Proceedings, 2011. (Cité en page 16.)
- [Tseng *et al.* 2011b] Y. . Tseng, F. . Yu et F. . Huang. *A green assembly sequence planning model with a closed-loop assembly and disassembly sequence planning using a particle swarm optimization method*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 57, no. 9-12, pages 1183–1197, 2011. (Cité en page 16.)
- [Tsujimura *et al.* 1995] Y. Tsujimura, M. Gen et E. Kubota. *Solving fuzzy assembly-line balancing problem with genetic algorithms*. Computers and Industrial Engineering, vol. 29, pages 543–547, 1995. (Cité en page 30.)
- [Turowski & Morgan 2005] M. Turowski et M. Morgan. *Disassembly Line Design with Uncertainty*. 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 1, pages 954–959, 2005. (Cité en page 31.)
- [Urban & Chiang 2006] Timothy L. Urban et Wen-Chyuan Chiang. *An optimal piecewise-linear program for the U-line balancing problem with stochastic task times*. European Journal of Operational Research, vol. 168, pages 771–782, 2006. (Cité en page 30.)
- [Üster *et al.* 2007] Halit Üster, Gopalakrishnan Easwaran, Elif Akçali et Sila Çetinkaya. *Bender's decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model*. Naval Research Logistics (NRL), vol. 54, no. 8, pages 890–907, 2007. (Cité en page 41.)
- [Van Slyke & Wets 1969] R. M. Van Slyke et R. Wets. *L-shaped linear programs with applications to optimal control and stochastic programming*. SIAM Journal on Applied Mathematics, vol. 17, pages 638–663, 1969. (Cité en page 41.)
- [Vermeulen *et al.* 2011] I. Vermeulen, J. Van Caneghem, C. Blocka, J. Baeyens et C. Vandecasteele. *Automotive shredder residue (ASR) : Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation*. Journal of Hazardous Materials, vol. 190, pages 8–27, 2011. (Cité en page 6.)
- [Vongbunyong *et al.* 2013a] S. Vongbunyong, S. Kara et M. Pagnucco. *Application of cognitive robotics in disassembly of products*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 62, no. 1, pages 31–34, 2013. (Cité en page 19.)
- [Vongbunyong *et al.* 2013b] S. Vongbunyong, S. Kara et M. Pagnucco. *Basic behaviour control of the vision-based cognitive robotic disassembly automation*. Assembly Automation, vol. 33, no. 1, pages 38–56, 2013. (Cité en page 19.)

- [Wan & Gonnuru 2013] H. . Wan et V. K. Gonnuru. *Disassembly planning and sequencing for end-of-life products with RFID enriched information*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 29, no. 3, pages 112–118, 2013. (Cité en page 16.)
- [Wang & Huang 2013] H. . Wang et Y. . Huang. *A two-stage robust programming approach to demand-driven disassembly planning for a closed-loop supply chain system*. International Journal of Production Research, vol. 51, no. 8, pages 2414–2432, 2013. (Cité en page 14.)
- [Wang & Shi 2014] W. L. Wang et X. J. Shi. Disassembly sequence planning based on poisoning ant colony algorithm, volume 572 of *Key Engineering Materials*, chapitre V. CAD/CAM/CAE, pages 340–343. 2014. (Cité en page 16.)
- [Watanabe & Ellis 1994] Tsunemi Watanabe et Hugh Ellis. *A joint chance-constrained programming model with row dependence*. European Journal of Operational Research, vol. 77, no. 2, pages 325 – 343, 1994. (Cité en page 77.)
- [Weyrich & Wang 2013] M. Weyrich et Y. Wang. *Architecture design of a vision-based intelligent system for automated disassembly of E-waste with a case study of traction batteries*. In IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 2013. (Cité en page 19.)
- [Wiendahl *et al.* 2001] H.P. Wiendahl, B. Scholz-Reiter, S. Bürkner et H. Scharke. *Flexible disassembly systems-layouts and modules for processing obsolete products*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Engineering Manufacture, vol. 2015, pages 723–732, 2001. (Cité en page 19.)
- [Wu & Zuo 2009a] H. Wu et H. Zuo. *Product disassembly sequence planning based on improved genetic algorithm*. Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering, vol. 20, no. 6, pages 699–703, 2009. (Cité en page 16.)
- [Wu & Zuo 2009b] H. Wu et H. Zuo. *Using genetic/simulated annealing algorithm to solve disassembly sequence planning*. Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 20, no. 4, pages 906–912, 2009. (Cité en page 16.)
- [Xia *et al.* 2013] K. Xia, L. Gao, L. Wang, W. Li et K. . Chao. *A simplified teaching-learning-based optimization algorithm for disassembly sequence planning*. In Proceedings - 2013 IEEE 10th International Conference on e-Business Engineering, ICEBE 2013, pages 393–398, 2013. (Cité en page 16.)
- [Xing *et al.* 2012] Y. Xing, C. Wang et Q. Liu. *Disassembly sequence planning based on Pareto ant colony algorithm*. Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering, vol. 48, no. 9, pages 186–192, 2012. (Cité en page 16.)
- [Xu & Xiao 2009] W. Xu et T. Xiao. *Robust balancing of mixed model assembly line*. COMPEL : The International Journal for Computation and Mathematics in Elec-

- tricaland Electronic Engineering, vol. 28, no. 6, pages 1489–1502, 2009. (Cité en page 30.)
- [Xu & Xiao 2011] W. Xu et T. Xiao. *Strategic robust mixed model assembly line balancing based on scenario planning*. Tsinghua Science & Technology, vol. 16, no. 3, pages 308–314, 2011. (Cité en page 30.)
- [Xu et al. 2011] J. Xu, S. . Zhang et S. . Fei. *Product remanufacture disassembly planning based on adaptive particle swarm optimization algorithm*. Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/Journal of Zhejiang University (Engineering Science), vol. 45, no. 10, pages 1746–1752, 2011. (Cité en page 16.)
- [Yang et al. 2012] G. Yang, H. Jin, B. Na et H. Du. *Disassembly sequence planning based on community structure algorithm and knowledge*. International Review on Computers and Software, vol. 7, no. 6, pages 3106–3112, 2012. (Cité en page 16.)
- [Yeh & Wei 2013] W. . Yeh et S. . Wei. *Simplified swarm optimization in efficient tool assignment of disassembly sequencing problem*. In 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2013, pages 2712–2719, 2013. (Cité en page 16.)
- [Yeh 2012a] W. . Yeh. *Optimization of the disassembly sequencing problem on the basis of self-adaptive simplified swarm optimization*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Systems, vol. 42, no. 1, pages 250–261, 2012. (Cité en page 16.)
- [Yeh 2012b] W. . Yeh. *Simplified swarm optimization in disassembly sequencing problems with learning effects*. Computers and Operations Research, vol. 39, no. 9, pages 2168–2177, 2012. (Cité en page 16.)
- [Youssif et al. 2011] M. M. Youssif, R. A. Alkadeem et M. A. El Dardiry. *Incorporating ergonomic factors in disassembly sequence planning*. Alexandria Engineering Journal, vol. 50, no. 3, pages 213–217, 2011. (Cité en page 19.)
- [Yu 2012] Yuan Zheng Yu. Research on disassembly sequence planning in dfd, volume 516-517 of *Advanced Materials Research*, chapitre 9 : Electrician Theory and Electric Device, pages 1865–1869. 2012. (Cité en page 16.)
- [Zacharia & Nearchou 2012] P. Zacharia et A. Nearchou. *Multi-objective fuzzy assembly line balancing using genetic algorithms*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 23, no. 3, pages 615–627, 2012. (Cité en page 30.)
- [Zeid et al. 1997] I. Zeid, S.M. Gupta et T. Bardasz. *A case-based reasoning approach to planning for disassembly*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 8, pages 97–106, 1997. (Cité en page 16.)
- [Zha & Lim 2000] X.F. Zha et S.Y.E. Lim. *Assembly/disassembly task planning and simulation using expert Petri nets*. International Journal of Production Research, vol. 38, pages 3639–3676, 2000. (Cité en page 16.)

- [Zhang & Li 2011] H. Zhang et P. Li. *Chance constrained programming for optimal power flow under uncertainty*. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 4, pages 2417–2424, 2011. (Cité en page 77.)
- [Zhang & Zhang 2009] X. . Zhang et S. . Zhang. *Product disassembly sequence planning based on particle swarm optimization algorithm*. Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS, vol. 15, no. 3, pages 508–514, 2009. (Cité en page 16.)
- [Zhang & Zhang 2010] X. F. Zhang et S. Y. Zhang. *Product cooperative disassembly sequence planning based on branch-and-bound algorithm*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 51, no. 9-12, pages 1139–1147, 2010. (Cité en page 16.)
- [Zhang *et al.* 2011] X. F. Zhang, S. Y. Zhang, L. M. Qiu, X. H. An et R. N. Sa. Virtual disassembly simulation of varying target component for complex products, volume 189-193 of *Advanced Materials Research*, chapitre Manufacturing Process Technology, pages 2467–2471. 2011. (Cité en page 14.)
- [Zhang *et al.* 2014a] L. Zhang, H. Peng, B. Bian et H. Bao. *Parallel disassembly modeling and planning method of complex products*. Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering, vol. 25, no. 7, pages 937–943, 2014. (Cité en page 14.)
- [Zhang *et al.* 2014b] X. F. Zhang, G. Yu, Z. Y. Hu, C. H. Pei et G. Q. Ma. *Parallel disassembly sequence planning for complex products based on fuzzy-rough sets*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pages 1–9, 2014. (Cité en page 16.)
- [Zhao & Li 2010] S. . Zhao et Y. Li. *Disassembly sequence decision making for products recycling and remanufacturing systems*. In Proceedings - 2010 International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2010, volume 1, pages 44–48, 2010. (Cité en page 16.)
- [Zhao *et al.* 2007] Xiaobo Zhao, Jianyong Liu, Katsuhisa Ohno et Shigenori Kotani. *Modeling and analysis of a mixed-model assembly line with stochastic operation times*. Naval Research Logistics (NRL), vol. 54, no. 6, pages 681–691, 2007. (Cité en page 29.)
- [Zhao *et al.* 2010] S. . Zhao, N. He et Y. Li. *Study on disassembly sequence decision making for products recycling and remanufacturing systems*. In IET Conference Publications, volume 2010, pages 282–287, 2010. (Cité en page 16.)
- [Zhao *et al.* 2014a] B. Zhao, J. Liu, R. Ning et J. Liu. *A motion planning based on selective disassembly sequence planning method*. Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering, vol. 50, no. 7, pages 136–145, 2014. (Cité en page 16.)

- [Zhao *et al.* 2014b] S. . Zhao, Y. . Li, R. Fu et W. Yuan. *Fuzzy reasoning Petri nets and its application to disassembly sequence decision-making for the end-of-life product recycling and remanufacturing*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 27, no. 5, pages 415–421, 2014. (Cité en page 16.)
- [Zhong *et al.* 2011] L. Zhong, S. Youchao, O. E. Gabriel et W. Haiqiao. *Disassembly sequence planning for maintenance based on metaheuristic method*. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, vol. 83, no. 3, pages 138–145, 2011. (Cité en page 16.)
- [Zhu *et al.* 2014] X. Zhu, Z. Zhang, X. Zhu et J. Hu. *An ant colony optimization algorithm for multi-objective disassembly line balancing problem*. Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering, vol. 25, no. 8, pages 1075–1079, 2014. (Cité en page 17.)
- [Zorgati & Van Ackooij 2011] R. Zorgati et W. Van Ackooij. *Optimizing financial and physical assets with chance-constrained programming in the electrical industry*. Optimization and Engineering, vol. 12, no. 1-2, pages 237–255, 2011. (Cité en page 77.)
- [Zorpas & Inglezakis 2012] Antonis A. Zorpas et Vassilis J. Inglezakis. *Technology in Society Automotive industry challenges in meeting EU 2015 environmental standard*. Technology in Society, vol. 34, no. 1, pages 55–83, 2012. (Cité en pages 1 et 6.)
- [Zussman & Zhou 1999] E. Zussman et M. Zhou. *A methodology for modeling and adaptive planning of disassembly processes*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 45, pages 190–194, 1999. (Cité en page 16.)
- [Zussman & Zhou 2000] E. Zussman et M.C. Zhou. *Design and implementation of an adaptive process planner for disassembly processes 16, .* IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 16, pages 171–179, 2000. (Cité en page 16.)



Page laissée
intentionnellement vide

École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

NNT : 2014 EMSE 0758

Mohand Lounes BENTHAHA

Combinatorial design of disassembly lines under uncertainties

Speciality : INDUSTRIAL ENGINEERING

Abstract :

This thesis is dedicated to the problem of disassembly line design in uncertain context. A disassembly line can be represented as a succession of workstations where tasks are performed sequentially at each workstation. The design of such a product recovery system can be reduced to a combinatorial optimization problem which seeks a line configuration that optimizes certain objectives under technical, economical and environmental constraints.

We begin by describing the principal product recovery activities especially disassembly. Then, after a literature review on the design of production lines under uncertainty of task processing times, we focus our study on the consideration of the disassembly task time uncertainties. Hence, we present three main models as well as the associated solution approaches. The first one is interested in minimizing the line stoppages caused by the task processing time uncertainties. The second one seeks to guarantee an operational level closely related with the line speed. The goal of the third model is to integrate the line design and sequencing problems. At last, the performances of the proposed solution approaches are presented by analyzing the optimization results on a set of instances of industrial size.

Key words : product recovery; assembly; disassembly; line design and balancing; sequencing; uncertainty; stochastic programming; probabilistic constraints; cone programming; Lagrangian relaxation.

École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

NNT : 2014 EMSE 0758

Mohand Lounes BENTHAHA

Conception combinatoire des lignes de désassemblage sous incertitudes

Spécialité : GÉNIE INDUSTRIEL

Résumé :

Les travaux présentés dans ce manuscrit portent sur la conception des lignes de désassemblage en contexte incertain. Une ligne de désassemblage consiste en une succession de postes de travail où les tâches sont exécutées séquentiellement au niveau de chaque poste. La conception d'un tel système, de revalorisation des produits en fin de vie, peut être ramenée à un problème d'optimisation combinatoire. Ce dernier cherche à obtenir une configuration permettant d'optimiser certains objectifs en respectant des contraintes techniques, économiques et écologiques.

Dans un premier temps, nous décrivons les activités principales de la revalorisation des produits en fin de vie, en particulier le désassemblage. Puis, après présentation des travaux de la littérature portant sur la prise en compte des incertitudes des durées opératoires lors de la conception des lignes de production, nous nous focalisons sur l'étude des incertitudes des durées opératoires des tâches de désassemblage. Ainsi, nous présentons trois modélisations principales avec leurs approches de résolution. La première s'intéresse à la minimisation des arrêts de la ligne causés par les incertitudes des durées des opérations de désassemblage. La deuxième cherche à garantir un niveau opérationnel de la ligne lié à sa cadence de fonctionnement. Le but de la troisième modélisation est l'intégration des problématiques de conception des lignes et de séquençement des tâches de désassemblage. Enfin, les performances des méthodes de résolution proposées sont présentées en analysant les résultats d'optimisation sur un ensemble d'instances de taille industrielle.

Mots clés : revalorisation de produits ; assemblage ; désassemblage ; conception et équilibrage des lignes ; séquençement de tâches ; incertitude ; programmation stochastique ; contraintes probabilisées ; programmation conique ; relaxation lagrangienne.
